

畑地における窒素溶脱に関する研究

—ライシメーター試験による施肥窒素の溶脱過程と窒素収支の解析—

(Studies on Nitrogen Leaching in Upland Field)

(-Analysis of Nitrate Leaching and Nitrogen Balance by Lysimeters-)

神 野 雄 一

2000

目次

	頁
第1章 緒言	1
第2章 黒ボク土シバ畑における窒素溶脱	
1. 目的	4
2. 材料および方法	4
3. 結果	
1) 土壌溶液中の硝酸態窒素濃度	6
2) 浸透水量と浸透水のイオン組成	6
3) 浸透水の硝酸態窒素濃度と窒素溶脱量	7
4) シバの窒素吸収量	8
5) 土壌中における施肥窒素の残存量	8
4. 考察	
1) シバ畑における施肥窒素の溶脱過程	8
2) シバ畑における窒素収支	11
第3章 砂質土ナガイモ畑における窒素溶脱	
1. 目的	21
2. 材料および方法	21
3. 結果	
1) 土壌溶液中の硝酸態窒素濃度	22
2) 浸透水の硝酸態窒素濃度と窒素溶脱量	23
3) ナガイモの窒素吸収量	24
4) 土壌中における施肥窒素の残存量	24
4. 考察	
1) ナガイモ畑における施肥窒素の溶脱過程	24
2) ナガイモ畑における窒素収支	27

第4章 ナシ園における窒素の溶脱

第1節 黒ボク土ナシ園における窒素溶脱

1. 目的	36
2. 材料および方法	36
3. 結果	
1) 浸透水量	37
2) 浸透水の硝酸態窒素濃度	38
3) 窒素溶脱量	38
4) 樹体生育と果実収量	39
5) ナシ樹の窒素吸収量	39
6) 土壌からの窒素無機化量	39
7) 土壌全窒素含量の変化	39
4. 考察	
1) ナシ園における窒素の溶脱過程	40
2) ナシ園における窒素収支	42

第2節 施肥窒素量が窒素溶脱に及ぼす影響

1. 目的	51
2. 材料および方法	51
3. 結果	
1) 土壌溶液中の硝酸態窒素濃度	52
2) 浸透水の硝酸態窒素濃度と窒素溶脱量	53
3) 樹体生育と果実品質	54
4. 考察	
1) 施肥窒素量が窒素溶脱に及ぼす影響	55
2) 草生の導入による窒素溶脱量の変化	56

第5章 被覆肥料の施用効果と窒素溶脱への影響

1. 目的	69
2. 材料および方法	70
3. 結果	
1) シバに対する被覆肥料の施用効果	71

2) ナガイモに対する被覆肥料の施用効果	73
3) ナシに対する被覆肥料の施用効果	75
4. 考察	
1) シバに対する被覆肥料の肥効と窒素溶脱への影響	76
2) ナガイモに対する被覆肥料の肥効と窒素溶脱への影響	79
3) ナシに対する被覆肥料の肥効と窒素溶脱への影響	81
第6章 総合考察	
1. シバ, ナガイモ, ナシ栽培における窒素溶脱の実態	97
2. 窒素溶脱に影響を及ぼす要因	99
3. 地下水汚染への影響と今後の課題	103
4. 窒素施肥の問題点と改善方向	105
第7章 総括および結論	109
謝辞	112
引用文献	113
英文要約	122

第1章 緒 言

欧米においては、1970年代から農耕地に施用した化学肥料に由来する溶脱窒素による水質の汚染^{1~4)}が顕在化し、環境に対する負荷の少ない施肥による持続的な農業への転換が進行中である。わが国では、農業形態の違い、畑地と水田における施肥成分の挙動の違い等のために欧米諸国ほど注意が払われていなかった。ところが、1980年代に至って各地で浅層地下水の硝酸態窒素濃度^{5,6)}が 10mgL^{-1} を超過していることが明らかになり、畑地からの窒素溶脱の実態を明らかにすることが急務となっている。

沖縄県宮古島⁷⁾では、サトウキビ畑からの施肥窒素の溶脱が地下水汚染の一因とされ、施肥窒素の47%が地下浸透すると推定されている。また、岐阜県各務原市のニンジン畑^{8,9)}、長野県のレタス畑¹⁰⁾においても同様に畑地に対する施肥が汚染源として指摘されるに至っている。そして、水質保全のための調査研究^{11~14)}が各地で実施されているが、多様な要因が関与しているため、地域条件に沿った取り組みが必要となっている。

鳥取県の畑地は、大山山麓の黒ボク土地帯にシバ、ナシ、スイカが、海岸沿いの砂丘地帯にナガイモ、ラッキョウ、ネギ、ブドウが作付けられ産地を形成している。しかし、これらの畑地における肥料成分の溶脱についてはほとんど調査されていないのが現状であり、環境への負荷の増大が懸念される。とくに、砂丘畑においては浅層地下水の硝酸態窒素濃度が 10mgL^{-1} を越える測定事例も現れており、早急な対策が必要になっている。

シバは大山山麓の黒ボク畑を中心に、全国の約10%にあたる1,500haが栽培されている。シバ生産にあたっては 300kg ha^{-1} 程度の窒素が施用されているが、窒素溶脱に関する報告は見あたらない。これらの生産シバは、ゴルフ場、公園緑地、道路法面等に利用されており、ゴルフ場のシバ地管理においても $200 \sim 400\text{kg ha}^{-1}$ の窒素が施用されている。山間部や丘陵地に造成されたゴルフ場から溶脱した施肥窒素の影響は、今のところ問題とはなっていないが、早急に溶脱過程を解明する必要がある。

砂畑においては、県東部でラッキョウ、中部でナガイモとブドウ、西部で白ネギが栽培されている。施肥窒素量はラッキョウとブドウが 200kg ha^{-1} 、ナガイ

モと白ネギが $400 \sim 500\text{kg ha}^{-1}$ となっている。砂畑では肥料の流亡が激しいため多肥が栽培経験上の常識となっているが、作物毎の養分吸収量や個々の養分動態について調査された例は少なく、現状の施肥体系も溶脱を考慮した施肥法になっていないのが実態である。砂丘地土壤は養分保持力、保水力に乏しいことは事実であるが、養水分管理が容易であるという利点もある。今後の砂丘地営農のためには、作物の養分吸収に合致して溶脱量が少ない合理的な施肥技術を開発導入する必要がある。

ナシは、黒ボク畑を中心に約 $2,500\text{ha}$ が栽培され、主要品種である二十世紀は全国生産量の約 50% に及んでいる。ナシに対する施肥は、年間施肥窒素量として $150 \sim 250\text{kg ha}^{-1}$ が施用され、樹齢の進行に伴って近年はやや増加傾向にある。ナシの施肥窒素量は、果樹の中では柑橘類の $300 \sim 350\text{kg ha}^{-1}$ に比べれば少ないものの、ブドウやモモの $100 \sim 200\text{kg ha}^{-1}$ より多くなっている。その中で施肥窒素量が $1,000\text{kg ha}^{-1}$ を越える茶樹については、溶脱による環境汚染が指摘されているが、果樹類を対象にした窒素溶脱の知見は、他の作物に比べてきわめて少なく、その実態は明らかではない。

一方、窒素溶脱を軽減できる肥料として、肥効が緩やかで窒素溶出の調節が可能な被覆肥料が注目されている。水稻では養分吸収に合致した被覆肥料を選択することで、施肥量の削減と窒素溶脱の軽減が可能なことが解明され、既に実用化に至っている。しかし、その他の作物については、肥効や作物毎の適切な種類、窒素溶脱への影響について明らかではないため普及が遅れている。被覆肥料の利用にあたっては、これらのことを作物毎に解明する必要がある。

施肥窒素の溶脱は、作物、地形や土壌条件、気象環境、施肥量及び施肥法等によって大きく異なることが予想され、地域的な諸条件に沿った評価が必要である。

本研究は、鳥取県中部地域の畑地における窒素動向を明らかにすることによって、環境保全のための効率的な窒素供給を図ろうとするものである。研究対象としては、当地域の主要作物であるシバ、ナガイモ、ナシを代表作物とし、ライシメーター試験によって各作物における施肥窒素の溶脱過程と窒素収支を解析し、窒素溶脱の実態を明らかにする。そして、窒素溶脱に影響する要因について考察し、溶脱軽減のための改善に役立てることを目的とする。

論文の構成は以下のようである。

まず、第2章において黒ボク土シバ畑の慣行施肥による窒素の溶脱過程を解明する。また、¹⁵Nトレーサー法によって施肥窒素の行動を追跡し、シバ畑における窒素収支を明らかにする。

第3章では、砂質土ナガイモ畑を対象に、慣行施肥による窒素の溶脱過程を解明する。そして、同様に¹⁵Nトレーサー法によって窒素溶脱が激しいとされる砂質土における施肥窒素の溶脱割合を明らかにする。

第4章では、黒ボク土ナシ園を対象に、長期にわたるライシメーター試験の結果をもとに窒素の溶脱過程と窒素収支を明らかにする。さらに、施肥窒素量の増加および草生導入に伴う窒素溶脱の影響について検討し、施肥窒素の許容限界量を推定する。

第5章では、窒素溶脱の低減に効果があるとされる被覆肥料を用い、シバ、ナガイモ、ナシ栽培における各種被覆肥料の窒素溶出特性を明らかにするとともに、その肥効と窒素溶脱に及ぼす影響を評価する。

第6章では、本研究によって得られた結果を総合し、各作物における窒素溶脱の実態を考察する。そして、窒素溶脱軽減のための方策について論ずる。

第2章 黒ボク土シバ畑における窒素溶脱

1. 目 的

シバによる草地は公園緑地，ゴルフ場，道路法面等において多方面に利用されており，それらへのシバ供給のために，わが国では約 15,000ha¹⁵⁾ の生産シバ畑がある．そして，鳥取県中部地域は黒ボク土において全国の約 10 %を生産する主要な産地となっている．

シバ生産は，裸地に種シバを植え付け約 1 年の生育の後，シバ茎葉を土壌とともにはぎ取って出荷し，翌年からは土中に残った地下茎からの再生によって栽培を繰り返している．その間，年 10 回程度，施用窒素量で 300kg ha^{-1} の施肥を実施している．一方，ゴルフ場のシバ地管理においても，200 ～ 400kg ha^{-1} の窒素が施用¹⁶⁾ されており，シバ地からの溶脱窒素による水系汚染が懸念されている．草地における施肥窒素の行動については，諸外国の研究事例^{17) ～ 20)} が多い．しかし，わが国における報告は，きわめて少ないのが現状である．

畑地からの窒素溶脱については，野菜栽培畑を対象に多くの調査事例があり，総説^{21,22)} も発表されているが，シバ畑を対象にした報告はほとんどなく，その実態は解明されていない．そこで，黒ボク土シバ畑における施肥窒素の動態を明らかにするために，ライシメーターを用いて植物吸収量，溶脱量，土壌残存量を測定し，窒素収支を明らかにした．

2. 材料および方法

1) ライシメーターの規模と供試土壌

試験は鳥取県園芸試験場内に設置されたライシメーターを用いて行った．供試ライシメーターは，直径 90cm の円筒形コンクリート製で，深さは 1.2m である．充填土壌は，鳥取県の代表的な畑土壌である表層腐植質黒ボク土藤沢統の層位を再現したものとして，表層に腐植層を 35cm，下層に赤褐色の心土を 55cm の厚さに充填した（鳥取県東伯郡大栄町青木で採土し，1993 年 11 月に充填）．なお，ライシメーターの壁面は，土壌表面より約 10cm 高く，表面流去水は発生しない構造になっている．供試土壌の理化学性を第 2-1 表に示した．

2) 施肥法と栽培概要

試験は 1994 ～ 1996 年の 3 年間にわたって実施した。供試作物の栽培概要は第 2-2 表のとおりで、1994 年 4 月にコウライシバ (*Zoysia matrella* MERR) を新植し、当年の生育量調査を 11 月に行い、収穫を 3 月に行う作型で実施した。施肥窒素量は第 2-3 表に示すように、慣行施肥として新植の 1994 年が 24gm^{-2} 、1995 年と 1996 年が 33gm^{-2} とし、1 回 3gm^{-2} を 4 月から 9 月までほぼ半月毎に施用した。慣行施肥による処理はライシメーター 2 基を使用した。そのうちの 1 基は施肥窒素の動態を把握するため、施用窒素の ^{15}N が 3.65atom% になるように、重窒素でラベルした硫酸アンモニウム、尿素および硝酸カリウムを用いて調製し、混合施用した。さらに、無肥料としてシバを栽植したものとシバを栽植しないものを 1 基ずつ供試した（以下、無肥料（栽植）及び無肥料（無栽植）と呼ぶ）。

3) 試料採取法と分析法

ライシメーターは、排水口に流量計を取り付け、約 20mm の降雨毎にバルブを開閉し、浸透水量の測定と試料の採取を行った。また、1995 年 5 月からは、採水毎に排出水量の 5 % を陰イオン交換樹脂 (Amberlite IR-400) を 40ml 充填したカラムに通し、硝酸イオンを捕捉した。そして、約 2 か月毎に 2molL^{-1} の塩化ナトリウムで吸着した硝酸イオンを溶出し、 ^{15}N 分析用試料を得た。

採水した浸透水は、直ちにイオン電極法²³⁾によって硝酸態窒素濃度を、イオンクロマトグラフによって各種陰イオンを、炎光法及び原子吸光法によって各種陽イオンを測定した。

慣行施肥と無肥料（無栽植）において、深さ 10, 20, 40, 60, 80cm にポーラスカップを埋設し、約 1 か月毎に吸引法によって土壌溶液を採取した。得られた試料は浸透水と同様に硝酸態窒素濃度を測定した。

シバ植物体は 6 月下旬、8 月下旬、11 月下旬に直径 10.4cm のゴルフ用カップホーラーを用いて、深さ 20cm まで土壌ごと円筒状に採取し、根を洗浄後、乾物重を測定して粉碎し、分析用試料とした。また、刈り込んだ茎葉は、その都度乾物重の測定後粉碎し分析用試料とした。

土壌採取は、1995 年 11 月に直径 9cm のポストホールオーガーを用い、ライシメーター 1 基につき 2 か所から 5 層 (0~5, 5~15, 15~30, 30~50, 50~90cm) に分けて採土した。

採取した植物体及び土壌試料は、ケルダール法で全窒素の測定を行った。ま

た、¹⁵N の測定は水蒸気蒸留（浸透水はデバルタ合金還元法、作物体と土壌はガンニング変法）で得られた窒素試料を用いた。

3. 結 果

1) 土壌溶液中の硝酸態窒素濃度

慣行施肥における土壌溶液中の硝酸態窒素濃度は、生育初期の4月に深さ10cmの表層で 56mgL^{-1} と高く、20～80cmでは $10 \sim 15\text{mgL}^{-1}$ の範囲にあった。5月以降の表層の窒素濃度は、 $1 \sim 3\text{mgL}^{-1}$ と低く経過した。表層においては、根系の発達が不十分な生育初期には施肥した窒素肥料による濃度上昇が認められたが、シバの生育が旺盛となった夏期には濃度の上昇が認められなかった。

2層以下においては、施肥に伴う生育初期の濃度ピークが5月には深さ20cm、7月には深さ40cmに移行し、10月には80cm以下に達した。秋期から冬期にかけては、土層全体が低濃度で経過し、翌年の5月になって施肥によって再び濃度が上昇する経過を示した（第2-1図）。

無肥料（無栽植）の場合は、7月に表層20cmにおいて窒素濃度が 52mgL^{-1} に上昇し、濃度ピークが10月に60cm、12月に60～80cmへと慣行施肥より遅れて、7月から12月にかけて下方に移動した。

2) 浸透水量と浸透水のイオン組成

年間降水量は、1994年と1995年が約1,900mmとほぼ平年並みの降水量を示し、1996年は約1,500mmと冬期に少ない気象経過であった。浸透水量は4月から11月のシバ生育期において、各年とも降水量とかん水量の合量の約60%が排出し、シバの休眠期にあたる12月から3月の冬期間は約90%が浸透排出した。年間浸透水量は第2-4表に示すとおりで、68.5～72.6%の排出割合を示した。

浸透水のイオン組成は、陽イオンとしてカルシウムが常に最も多く、アンモニウムは検出されなかった。陰イオンは塩素と硝酸が主要な構成成分であり、リン酸は検出されなかった（第2-5表）。浸透水の無機窒素形態としては、硝酸が主要な成分であり、窒素の溶脱過程を検討するにあたっては、硝酸のみの追跡で解析可能であった。なお、慣行施肥と無肥料でのイオン組成には、大きな差が認められなかった。

3) 浸透水の硝酸態窒素濃度と窒素溶脱量

慣行施肥における浸透水の硝酸態窒素濃度は、年次差はあるものの夏期に最高となり冬期に最低となる経過を示した。月平均濃度が 10mgL^{-1} 以上となったのは、1994 年が 5 月～9 月、1995 年が 6 月～12 月、1996 年が 8 月～11 月であり、各年とも冬期の 2 月には $1 \sim 2\text{mgL}^{-1}$ にまで低下した（第 2-2 図）。年平均の硝酸態窒素濃度は、1994 年が 5.8mgL^{-1} 、1995 年が 9.3mgL^{-1} 、1996 年が 7.5mgL^{-1} となり、水道水の水質基準値である 10mgL^{-1} より低かった。

無肥料（栽植）の硝酸態窒素濃度は、1994 年には慣行施肥とほぼ同様な推移を示したが、1995 年からは慣行施肥より低濃度で経過し、1996 年には 1 年を通して $1 \sim 3\text{mgL}^{-1}$ で推移した。無肥料（無栽植）の硝酸態窒素濃度は、夏期から冬期にかけて高く推移し、年毎に濃度が低下する経過を示した。

年間の窒素溶脱量は、無肥料（無栽植）が最も多く、次いで慣行施肥、無肥料（栽植）の順であった（第 2-6 表）。

慣行施肥の年間窒素溶脱量は、 $8.81 \sim 14.40\text{gm}^2$ を示し生育期の 4～11 月に 66～87 % が浸透排出した。無肥料（無栽植）の窒素溶脱量は、試験初年の 1994 年が 37.54gm^2 と多かったが、1995 年は 20.88gm^2 、1996 年は 13.66gm^2 と年毎に減少した。また、4～11 月の浸透排出割合は、45～55 % となり、シバを栽植した他の 2 区と比べて少なく、休眠期（12～3 月）の割合が多かった。無肥料（栽植）の窒素溶脱量は、 $0.94 \sim 8.50\text{gm}^2$ と少なく、無肥料（無栽植）と同様に年毎にほぼ半減する傾向を示した。また、溶脱時期は慣行施肥と同様に生育期に 73～93 % が浸透排出した。

¹⁵ N トレーサー法によって求めた浸透水に含まれる硝酸態窒素の施肥窒素寄与率は、1995 年において施肥後の 3 か月間は 0.6% で、施肥窒素の溶脱はほとんど認められなかった。夏期の 7～8 月は施肥窒素の寄与率が 45% に上昇し、11～12 月に 50% と最大になった。その後は徐々に減少して、次年の 3～5 月には 10% 以下となり、1 年 10 か月後の 2～3 月には 2% にまで減少した。1996 年の施肥においても前年とほぼ同様な推移を示し、8 月から施肥窒素の溶脱割合が増加して 10～11 月に最大となり、次年の 2～3 月には 11% に減少した（第 2-3 図）。また、年間を通した施肥窒素の寄与率は、1995 年が 43%、1996 年が 28% となり、それぞれ 6.2gm^2 、 2.5gm^2 が施肥窒素に由来する窒素溶脱量であった。

4) シバの窒素吸収量

シバ作物体の乾物重は、慣行施肥が $1.51 \sim 1.88\text{kgm}^{-2}$ となり 11 月には収穫可能となったのに対し、無肥料（栽植）は $0.71 \sim 1.20\text{kgm}^{-2}$ と少なく生育が劣った。慣行施肥は、7～8月の夏期に旺盛な生育を示して増加量が大きく、9～11月の秋期には減少した（第 2-7 表）。

シバの窒素吸収量は、慣行施肥が $26.2 \sim 33.0\text{gm}^{-2}$ 、無肥料（栽植）が $5.6 \sim 8.8\text{gm}^{-2}$ となり、施肥による吸収量の増加が大きかった（第 2-8 表）。また、無肥料（栽植）の窒素吸収量は、年々減少する傾向を示した。

^{15}N トレーサー法によって求めた施肥窒素の寄与率は、1994 年が 40.5%，1995 年が 55.4%，1996 年が 61.0%と年々増加する傾向を示した。慣行施肥による施肥窒素の吸収量は $13.4 \sim 19.3\text{gm}^{-2}$ となり、施肥窒素の 44.2～58.5 %がシバに吸収された（第 2-9 表）。また、土壌中に残存して翌年に吸収された前年の施肥窒素に由来する窒素の寄与率は、1994 年施肥で 4.7%，1995 年施肥で 6.3%であり、それぞれ 1.2gm^{-2} 、 2.0gm^{-2} の吸収窒素が前年の施肥に由来していた。

5) 土壌中における施肥窒素の残存量

供試土壌中には $1,186\text{gm}^{-2}$ の全窒素が存在した。 ^{15}N トレーサー法によって求めた施肥窒素寄与率は、0～5cm では 2.56%，5～15cm では 1.02%，15～90cm では 0.33～0.37%となり、表層で高かった。施肥窒素の土壌残存量は、表層ほど多くシバの根域（0～15cm）に 6.73gm^{-2} 、根域下層（15～90cm）に 2.70gm^{-2} で、0～90cm の土層内に合計 9.43gm^{-2} が存在した（第 2-10 表）。

4. 考 察

1) シバ畑における施肥窒素の溶脱過程

シバ畑に施用された窒素は、土壌中で硝酸態となりシバにより吸収され、残留分が水移動とともに下層に溶脱する。そして、土壌中の硝酸態窒素濃度は施肥窒素、土壌からの無機化窒素、シバによる吸収、土壌水分の影響を受けて変動している。

シバ畑における施肥は、4月から9月まで1回 3gm^{-2} の窒素を半月毎に11回に分施するのが慣行となっており、生育期間中ほぼ均等な窒素供給となっている。土壌窒素の無機化は、供試土壌が表層腐植質黒ボク土であることから、地

温上昇とともに増加して夏期に最大となると考えられ、本試験の無肥料（無栽植）における土壌溶液中の硝酸態窒素濃度も夏期に高まることを認めている。また、シバの窒素吸収は 5 月から増加し、7 ～ 8 月に最も多くなる経過を示している。

慣行施肥における土壌溶液中の硝酸態窒素濃度の変化をみると、4 月には表層 (10cm) で 56mgL^{-1} の高濃度が測定されたが、5 月以降は $1 \sim 3\text{mgL}^{-1}$ の低濃度で推移した。これは、根系の発達が不十分な生育初期には、窒素吸収量が少ないため施肥した窒素肥料によって土壌中の窒素濃度が上昇するものの、生育が旺盛となるに従って吸収量が増加し、夏期には施肥窒素量と土壌からの無機化窒素量に相当するシバの窒素吸収があったためと考えられる。諸外国の牧草地における浸透水の硝酸態窒素濃度^{17,19)}は、 3mgL^{-1} 以下であり、草地からの窒素溶脱による地下水への影響は少ないとしている。

土壌からの無機化窒素量は本試験においては未測定であるが、無肥料（無栽植）からの窒素溶脱量をみると、1994 年が 37.5gm^2 、1995 年が 20.8gm^2 、1996 年が 13.7gm^2 であることから、少なくともこれらを上回る量が地温上昇とともに無機化したと推定できる。また、溶脱窒素量が年毎に減少していることから、土壌からの窒素無機化は、新植時の堆肥施用と土壌充填時の攪乱による窒素発現の影響が大きいと考えられる。

シバの窒素吸収量は、慣行施肥で $26 \sim 32\text{gm}^2$ であった。各種野菜の窒素吸収量を取りまとめた結果⁴⁾によると、施肥窒素量 $20 \sim 33\text{gm}^2$ に対して窒素吸収量は $10 \sim 19\text{gm}^2$ としており、シバは一般野菜に比べて窒素吸収量が多い植物であると位置づけられる。施肥窒素の吸収は、¹⁵N トレーサー法によって求めた施肥窒素寄与率が 1994 年 40.5%、1995 年 55.4%、1996 年 61.0%と年々増加したことから、土壌窒素の無機化量が年々少なくなったため施肥窒素の影響が大きくなったことによるものと考えられる。

シバの主要な根群域は深さ 0 ～ 15cm に存在し、深さ 20cm 以下における硝酸態窒素の移動は水移動に依存する。施肥に伴う生育初期の濃度ピークは、5 月には深さ 20cm、7 月には深さ 40cm に移行し、10 月には深さ 80cm 以下に達していた。そして、翌年の施肥によって再び表層において濃度が上昇するパターンを示した。亀和田²⁴⁾が黒ボク露地畑において硝酸イオンの垂直分布を調査し

た事例によると、土層内(1m)の硝酸濃度ピークの移動は、1年周期で完結し、毎年同様のパターンを示すとしており、本試験においても周期性を示していた。

深さ 90cm からの浸透水における施肥窒素の影響は、¹⁵Nトレーサーによる試験結果から、施肥開始 3 か月後の 7 月から最終施肥 4 か月後の 1 月までが大きいと考えられる。施肥開始後、浸透水の施肥窒素寄与率が 40%以上になるまでの積算水量（降水量とかん水量の合計）は、1995 年が 420mm（4 月 11 日～6 月 30 日）、1996 年が 485mm（4 月 10 日～7 月 22 日）であり、施肥窒素が土層の深さ 90cm 以下に到達し、施肥窒素が多量に溶脱し始めるまでには 400mm 以上の積算水量が必要と考えられる。さらにその後、施肥窒素寄与率が 30%以下に低下するまでの積算水量は、1995 年が 1,289mm（7 月 1 日～1 月 5 日）、1996 年が 992mm（7 月 23 日～1 月 31 日）であり、施肥窒素の溶脱が少なくなるまでには 1,000mm 以上の積算水量が必要と考えられる。

ライシメーター試験における浸透水量は、土壌の種類と気象条件による影響が大きく、上村²⁵⁾がローム土壌の牧草植生下で年間降水量 1,400 ～ 1,900mm に対し 47%、野中・加村²⁶⁾が砂畑のダイコン・タバコ栽培下で降水量 2,200mm に対し 80%が浸透排出したとしている。また、松丸²⁷⁾は降水量に対して黒ボク土で 39%、砂土で 59%が浸透排出したとしている。本試験においては、夏期にかん水量が多かったこと、冬期に降水量が多くシバの休眠期となるため消費水量が少なかったことからみて、他のライシメーター試験に比べ排出割合がやや多い試験条件にあったと考えられる。

窒素溶脱量は、水の移動量の影響が大きいことが知られており²⁰⁾、本試験結果も生育期の浸透水量が多い年ほど増加することを認めている。そして、1995 年と 1996 年の施肥窒素溶脱量の年次差は、降水パターンの違いによるものと考えられる。すなわち、1995 年は施肥窒素の溶脱が始まった 7 月に連続降雨（7 月 1 日～7 月 23 日、430mm）があり、7～8 月だけで 3.5gm²もの施肥窒素が溶脱した。これに対し 1996 年は、7～8 月に降水量が少なかったため、浸透水の施肥窒素寄与率は高かったものの溶脱量は少なく、その後の降雨（8 月 31 日～10 月 4 日、194mm）により 8～9 月に 1.6gm²が溶脱するにとどまった。その結果、年間の施肥窒素溶脱量および施肥窒素寄与率は、1995 年に比べ、それぞれ 3.7gm²、15 %少ないという差を生じたと考えられる。さらに、シバ

の施肥窒素吸収量についてみても、1995 年が 1996 年よりも 4.7gm^{-2} 少なく、施肥期間の多量の降雨による溶脱によって低下したものと考えられる。

2) シバ畑における窒素収支

試験初年の 1994 年は、シバ新植のために中途からの施肥であることや土壌からの無機化窒素の影響が大きいと考えられることから、ライシメーター試験で得られた 1995 ～ 1996 年の 2 か年の測定結果を平均して、シバ畑における窒素収支を求めた（第 2-4 図）。

施肥窒素 33.0gm^{-2} は、土壌中に 9.4gm^{-2} が残存したことから、 23.6gm^{-2} が植物吸収や溶脱等に関与したと考えられる。供試土壌中の全窒素量は $1,186\text{gm}^{-2}$ であり、無肥料の溶脱窒素量から推定して少なくとも 17.2gm^{-2} が土壌からの無機化窒素量と考えられる。従って、施肥窒素の有効化量と合わせて 40.8gm^{-2} が無機化窒素の合計量と推定できる。深さ 90cm の土層から溶脱する窒素量は 11.6gm^{-2} であり、そのうち施肥窒素に由来する窒素量は溶脱窒素の 37.4%、施肥窒素の 13.2%にあたる 4.3gm^{-2} であった。無機化窒素のうちシバに吸収された窒素量は 29.0gm^{-2} で、このうち施肥窒素由来は 17.0gm^{-2} であったことから、施肥窒素のシバによる利用率は 51.5%となり、かなりの高い値を示した。

この他に窒素の動態として脱窒等が考えられる。牧草地（ケンタッキーブルーグラス）において脱窒量を測定した結果¹⁸⁾によると、施肥窒素の 1 %が脱窒したとしている。また、大気中への窒素の揮散は、土壌表層からのアンモニア揮散が多く、24 ～ 36 %とする報告¹⁷⁾もある。本試験の場合、¹⁵Nトレーサー法による施肥窒素の土壌残存量、溶脱量、吸収量の合計は施肥窒素量に対して 93%となったことから、脱窒量は多くないものと推測される。

ライシメーター試験によって施肥窒素の溶脱率を調査した事例によると、キャベツ栽培下の黒ボク土で 40 %、黄色土で 20 %²⁸⁾、イネ科作物栽培下の火山灰土壌で 25 %²⁹⁾、陸稲－キャベツ－サトイモの輪作栽培下の黒ボク土で 25 ～ 32 %²⁷⁾が施肥窒素に対する溶脱割合としている。本試験での施肥窒素の溶脱率は 13.2%であり、シバは野菜に比べれば窒素溶脱が少ない植物であるといえる。これは、施肥法が少量分施であることに加え、窒素吸収が旺盛なため施用した窒素が効率的に吸収されるためと考えられる。

一方、日高・伊藤³⁰⁾はスーダングラス栽培下では施肥窒素の溶脱率は 0.5%

以下であり，収穫後の溶脱はほとんど認められなかったとしているが，本試験のシバでは量的には少ないものの，2年後にまで施肥窒素の溶脱が続くことが確認され，生育に応じた適量施肥の重要性が示唆される．

藤井³¹⁾はシバ生育最盛期の施肥窒素量として1か月に4～6g m^{-2} が最適としており，シバが地表面に繁茂した条件では，少量を分施する現行の慣行施肥体系においては，施肥窒素の溶脱量はかなり少ないと考えられ，過剰な施肥をしない限りは，溶脱窒素の水系への流入は多くないものと判断できる．しかし，裸地に近いシバの生育初期においては，溶脱量が増加する危険があるので，生育状態に応じた適量施肥が重要と考えられる．

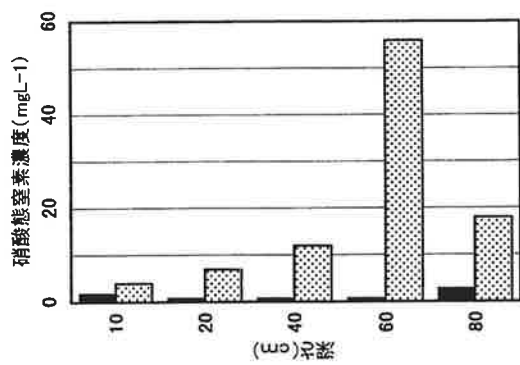
第2-1表 シバのライシメーター試験における供試土壌の理化学性

深さ (cm)	土色	土性	透水速度 (cm sec ⁻¹)	pH (H ₂ O)	全窒素 (g kg ⁻¹)	CEC (cmol (+) kg ⁻¹)	交換性塩基含量 (cg kg ⁻¹)			Truog P ₂ O ₅ (cg kg ⁻¹)
							CaO	MgO	K ₂ O	
0 ~ 35	10YR4/3	C L	8.2 × 10 ⁻²	5.7	3.75	26.0	101	21.8	9.8	1.9
35 ~ 90	7.5YR3/6	H C	5.4 × 10 ⁻⁴	5.7	0.50	16.9	66	64.1	0.8	0.8

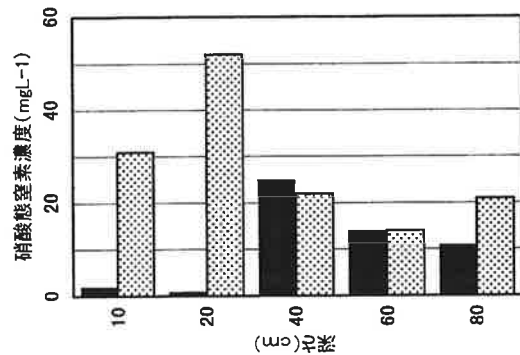
第2-2表 シバの栽培概要

調査年		シバの栽培管理実績 (月/日)	
1994年	シバ新植* (4/11)	施肥 8回 (5/16, 6/3, 6/16, 7/14, 8/1, 8/18, 9/19, 10/4) 刈り込み 5回, かん水33回 (1回あたり 5~15 L m ⁻²)	生育量調査 (11/15)
1995年	シバ収穫 (3/27)	施肥 11回 (4/1, 5/8, 5/25, 6/6, 6/26, 7/11, 8/3, 8/11, 8/29, 9/8, 9/19) 刈り込み 6回, かん水18回 (1回あたり 10~20 L m ⁻²)	生育量調査 (11/2)
1996年	シバ収穫 (3/13)	施肥 11回 (4/15, 5/7, 5/20, 6/3, 6/21, 7/4, 7/23, 8/6, 8/23, 9/3, 9/24) 刈り込み 6回, かん水7回 (1回あたり 10~20 L m ⁻²)	生育量調査 (11/3)

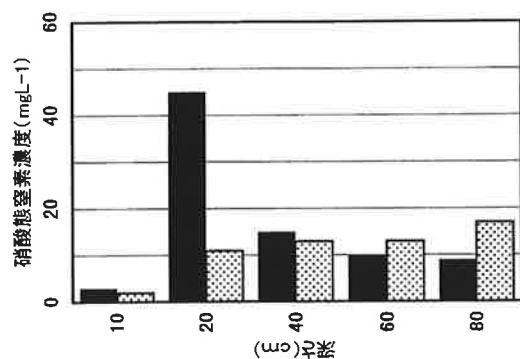
* シバの新植時は鳥取県芝栽培暦に従い, 牛糞堆肥 (全窒素含量 20g kg⁻¹) 1.7kgm⁻², 炭酸カルシウム 0.4kgm⁻², BMより 0.2kgm⁻²を深さ10cmに土壌混合施用した。なお, 無肥料 (栽植) だけは牛糞堆肥を施用しなかった。



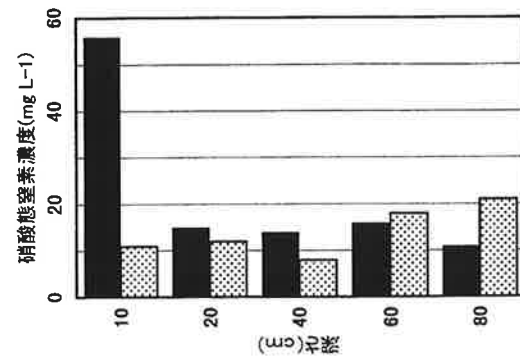
1994年4月14日



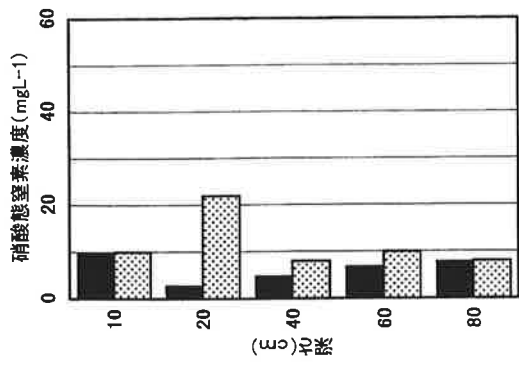
5月12日



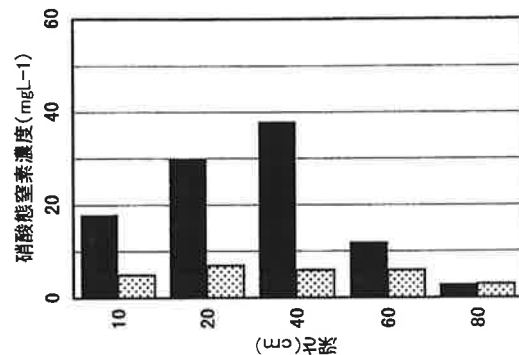
7月20日



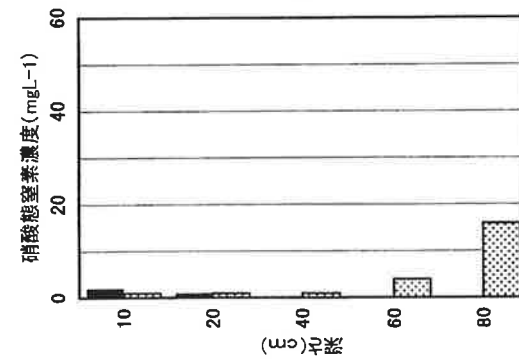
10月18日



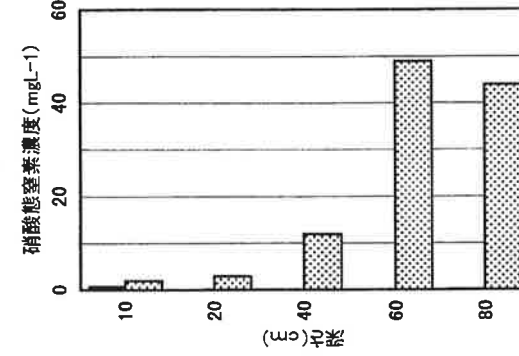
12月19日



1995年2月13日



5月27日



8月22日

慣行施肥 無肥料 (無栽植)

第2-1図 土壌溶液中の硝酸態窒素濃度の推移 (1994年4月～1995年8月)

第2-3表 試験区分と施肥窒素量

ライシ メータ ー No	試験区分	調査年	施肥窒素量 (g m ⁻²)							計
			4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月		
1	慣行施肥	1994年		3 ^d	3 ^d 3 ^d	3 ^d	3 ^c 3 ^c	3 ^c 3 ^c	24	
		1995年	3 ^a	3 ^b 3 ^b	3 ^b 3 ^b	3 ^b 3 ^b	3 ^a 3 ^a	3 ^a 3 ^a	33	
		1996年	3 ^c	3 ^d 3 ^d	3 ^d 3 ^d	3 ^d 3 ^d	3 ^c 3 ^c	3 ^c 3 ^c	33	
2	慣行施肥	1994年		3 ^b	3 ^b 3 ^b	3 ^b	3 ^a 3 ^a	3 ^a 3 ^a	24	
		1995年	3 ^c	3 ^d 3 ^d	3 ^d 3 ^d	3 ^d 3 ^d	3 ^c 3 ^c	3 ^c 3 ^c	33	
		1996年	3 ^a	3 ^b 3 ^b	3 ^b 3 ^b	3 ^b 3 ^b	3 ^a 3 ^a	3 ^a 3 ^a	33	
3	無肥料		無施用 (シバ栽植)							0
4	無肥料		無施用 (シバ無栽植)							0

^a 磷硝安加里S604 (16-10-14)

^b 尿素化成AM45 (15-15-15)

^c 磷硝安加里 (N1. 53g, 0. 37atom%) + 硝酸カリウム (N0. 92g, 7. 06atom%) + 硫酸アンモニウム (N0. 55g, 7. 09atom%),

^d 尿素化成 (N1. 16g, 0. 37atom%) + 尿素 (N1. 22g, 5. 01atom%) + 硫酸アンモニウム (N0. 62g, 7. 09atom%)

第2-4表 シバのライシメーター試験における水分収支 (全基の平均値)

調査年	降水量 (mm)			かん水量 (mm)			浸透排出水量 (mm)			排出 割合 (%)
	4～11月	12～3月	計	4～11月	12～3月	計	4～11月	12～3月	計	
1994年	922	966	1, 888	335	0	335	723	805	1, 528	68. 7
1995年	1, 077	780	1, 857	266	0	266	826	715	1, 541	72. 6
1996年	932	588	1, 520	211	0	211	667	548	1, 215	70. 2

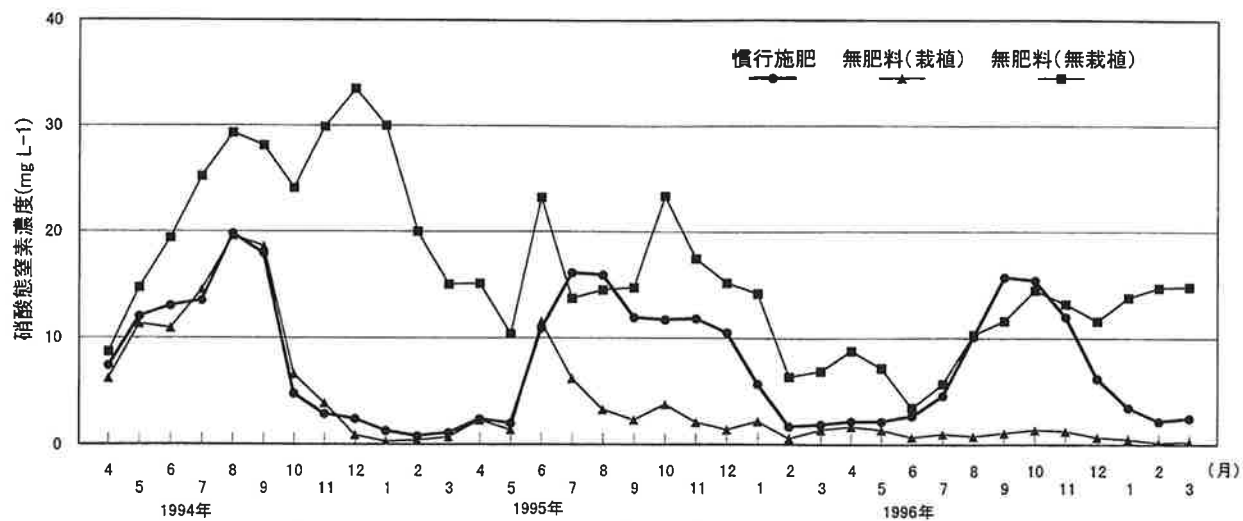
第2-5表 浸透水のイオン組成

処理区分	採水時期 (年. 月. 日)	浸透水のイオン濃度 (mgL ⁻¹)							
		K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
慣行施肥	1996. 3. 18	2. 1	14. 5	3. 0	n. d. *	1. 7	16. 0	n. d.	6. 5
	1996. 6. 26	2. 7	8. 9	3. 4	n. d.	3. 0	22. 3	n. d.	6. 2
	1996. 9. 12	3. 5	19. 9	4. 6	n. d.	15. 7	16. 2	n. d.	4. 9
無肥料（無栽植）	1996. 3. 18	2. 4	20. 6	2. 4	n. d.	13. 8	14. 1	n. d.	3. 9
	1996. 6. 26	2. 8	12. 1	2. 8	n. d.	3. 4	19. 0	n. d.	8. 3
	1996. 9. 12	4. 8	22. 8	4. 8	n. d.	11. 6	15. 0	n. d.	5. 2

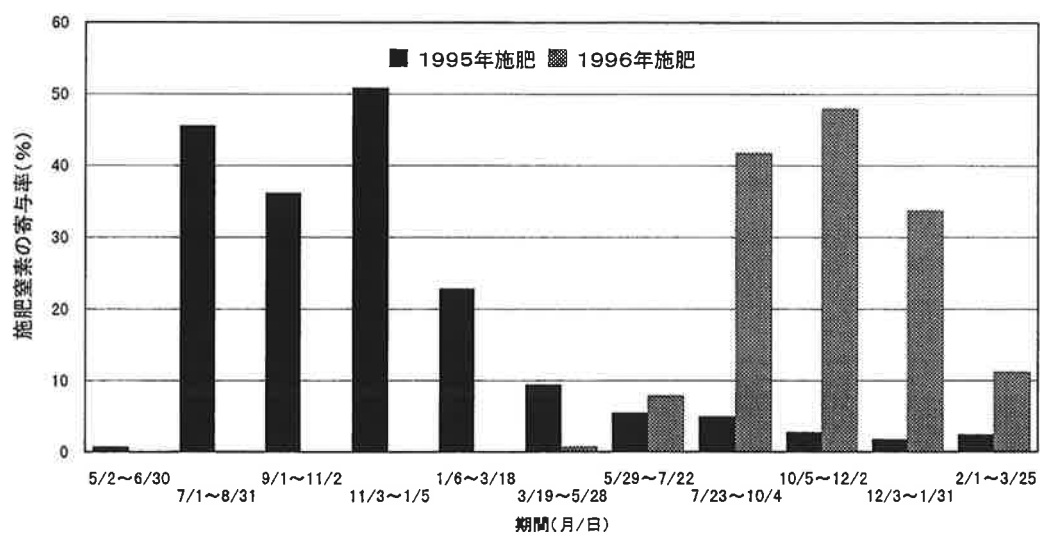
* n. d. は0.01mgL⁻¹以下にあり検出されなかったことを示す。

第2-6表 浸透排出水中の硝酸態窒素量 (gm⁻²)

処理区分	1994年			1995年			1996年		
	4～11月	12～3月	計	4～11月	12～3月	計	4～11月	12～3月	計
慣行施肥	7. 73	1. 16	8. 89	9. 55	4. 85	14. 40	6. 53	2. 28	8. 81
無肥料（栽植）	7. 97	0. 53	8. 50	3. 53	1. 15	4. 68	0. 69	0. 25	0. 94
無肥料（無栽植）	7. 13	20. 41	27. 54	11. 45	9. 38	20. 83	6. 13	7. 53	13. 66



第2-2図 浸透水中の硝酸態窒素濃度の推移



第2-3図 浸透排水中の施肥窒素寄与率の変化

第2-7表 シバ作物体の乾物重

処理区分	調査年	シバ作物体の期間別乾物増加量 (kg m ⁻²)			
		4～6月	7～8月	9～11月	計
慣行施肥	1994年	0.31	0.92	0.64	1.88
	1995年	0.61	0.58	0.32	1.51
	1996年	0.55	0.90	0.42	1.87
無肥料（栽植）	1994年	0.30	0.51	0.39	1.20
	1995年	0.42	0.21	0.18	0.81
	1996年	0.38	0.21	0.12	0.71

第2-8表 シバの窒素吸収量

処理区分	調査年	シバの期間別窒素吸収量 (g m ⁻²)			
		4～6月	7～8月	9～11月	計
慣行施肥	1994年	7.0	14.2	11.8	33.0
	1995年	11.2	8.7	6.3	26.2
	1996年	11.0	13.2	7.5	31.7
無肥料（栽植）	1994年	4.1	2.7	2.0	8.8
	1995年	3.7	2.5	0.2	6.4
	1996年	3.4	1.7	0.4	5.6

第2-9表 慣行施肥におけるシバの施肥窒素吸収量

施肥処理年次	調査年	施肥窒素寄与率* (%)	施肥窒素吸収量** (g m ⁻²)	施肥窒素利用率*** (%)
1994年	当年	40.5	13.4	55.7
	次年	4.7	1.2	5.0
1995年	当年	55.4	14.6	44.2
	次年	6.3	2.0	6.1
1996年	当年	61.0	19.3	58.5

* 施肥窒素寄与率(%) = シバの¹⁵N atom%excess ÷ 肥料の¹⁵N atom%excess × 100

** 施肥窒素吸収量 = 窒素吸収量 × 施肥窒素寄与率

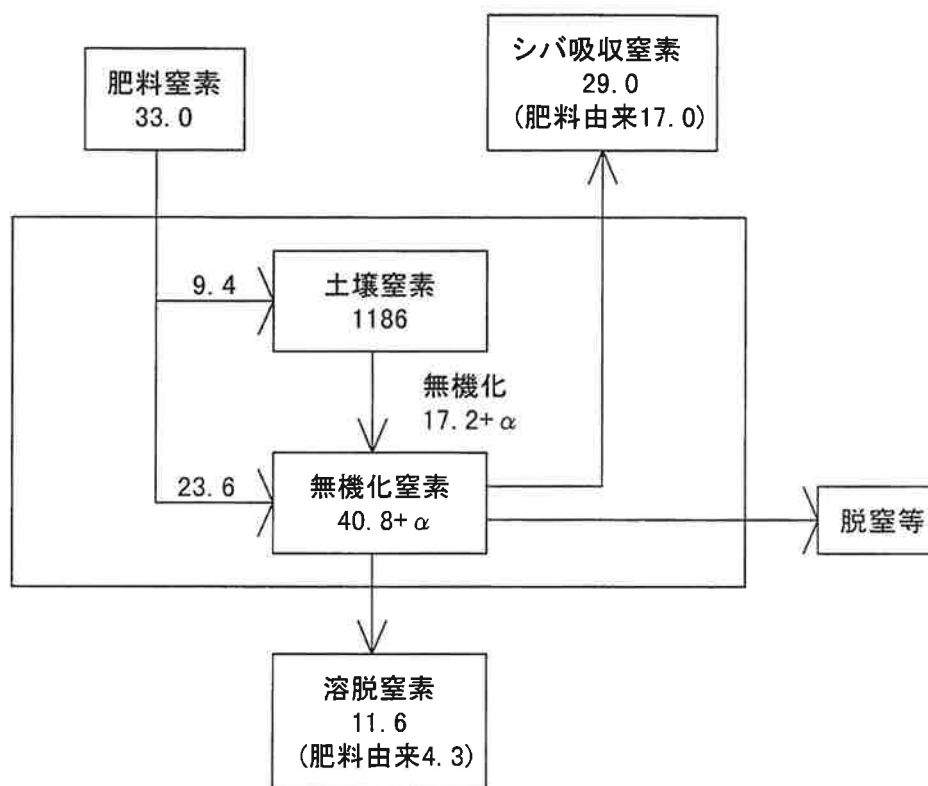
*** 施肥窒素利用率 = 施肥窒素吸収量 ÷ 窒素施用量 × 100

第2-10表 施肥窒素の土壌残存量

深さ (cm)	全窒素量 (g m ⁻²)	施肥窒素寄与率* (%)	施肥窒素残存量** (g m ⁻²)
0～5	157	2.56	4.02
5～15	266	1.02	2.71
15～30	368	0.37	1.36
30～50	153	0.35	0.54
50～90	242	0.33	0.80
計	1,186		9.43

* 施肥窒素寄与率(%) = 土壌の¹⁵N atom%excess ÷ 肥料の¹⁵N atom%excess × 100

** 施肥窒素残存量 = 各層位の全窒素量 × 施肥窒素寄与率



第2-4図 シバ栽植ライシメーターにおける窒素収支 (N gm^{-2})

第3章 砂質土ナガイモ畑における窒素溶脱

1. 目的

砂丘畑は、窒素肥沃度が低いために窒素の施用量が多く、さらに透水性が良好なために、降水やかん水によって窒素が溶脱しやすいことが知られている。砂質土における窒素溶脱については、ライシメーター試験によるいくつかの報告^{32)~35)}があり、施肥窒素量に対して43~67%もの窒素が溶脱するとされている。

鳥取県中部地域においては北条砂丘を中心に約200haでナガイモが栽培されている。古くは8月からの早期出荷をねらって多肥による促成栽培が行われていたが、現在は10月頃の収穫が多くなっている。ナガイモの年間施肥窒素量は、 $400 \sim 500 \text{ kg ha}^{-1}$ であり以前より減少したが、他の作物に比べて施用量が多く、長い栽培期間において肥効の効率化と溶脱軽減のために10回程度に分施するのが慣行となっている。ナガイモ栽培における窒素溶脱については、肥料試験での調査事例³⁶⁾はあるものの、自然降雨条件下で長期的に検討した事例はなく、現行の慣行施肥による施肥窒素の溶脱や窒素収支の実態は明らかではない。

そこで、砂丘ナガイモ畑における施肥窒素の動態について、ライシメーターを用いて作物吸収量、溶脱量、土壌残存量の解析を行った。

2. 材料及び方法

1) ライシメーターの規模と供試土壌

試験は鳥取県園芸試験場内に設置されたライシメーター（第2章と同様）を用いて行った。供試土壌は、場内砂畑ほ場（鳥取県東伯郡大栄町西園）から採取した砂丘未熟土内灘統の既耕地土壌を用い、1993年11月に1mの厚さに充填した。なお、処理開始前の供試土壌の理化学性を第3-1表に示した。

2) 処理区および栽培概要

試験は1994~1996年の3年間にわたって実施し、現行の施肥基準に従った施肥を行う慣行施肥区と無肥料区を設けた。

慣行施肥区における処理は、窒素成分量で 39.6 g m^{-2} を施用し、1994年にライ

シメーター 2 基を使用した。2 年目の 1995 年からは、そのうちの 1 基を施肥窒素の動態を把握するため、窒素の半量を施用窒素の形態に応じて ^{15}N が 3.66atom% になるように硫酸アンモニウム、尿素、硝酸カリウムを用いて調製し、混合施用した。なお、無肥料区は 1995 年から開始し、2 基を追加して調査を行った。

ナガイモの栽培概要は第 3-2 表に示すとおりで、4 月に元肥を施用後、一般栽培園に準じて 1 m^2 あたり 4.7 株の栽植密度で種芋を植え付け、追肥を 6 月から 9 月上旬まで月 3 回合計 10 回の施用とした。収穫は毎年 11 月に行い、翌年の植え付けまでは休耕とした。

3) 試料採取法と分析法

ライシメーターからの浸透水は、排水口にはね車式流量計を取り付け、約 20mm の降雨毎にバルブを開閉し、排出水量の測定と浸透水試料の採取を行った。また、第 2 章と同様に、1995 年 5 月からは、採水毎に排出水量の 5 % を陰イオン交換樹脂 (Amberlite IR-400) を 40ml 充填したカラムに通し、硝酸イオンを捕捉した。そして、約 2 か月毎に吸着した硝酸イオンを 2mol L^{-1} の塩化ナトリウムで溶出し、 ^{15}N 分析用試料を得た。

慣行施肥区と無肥料区のライシメーターにおいて、深さ 20, 70cm にポーラスカップを埋設し、約 1 か月毎に吸引法によって土壌溶液を採取した。得られた試料は浸透水と同様に硝酸態窒素濃度を測定した。

ナガイモは 11 月上旬に掘り上げ、茎葉は全量を、イモは 2mm にスライスして一部を乾燥後 ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 48 時間通風乾燥)、重量を測定して粉碎し、分析用試料とした。また、土壌は収穫時に直径 9cm のポストホールオーガーを用い、3 層 (0~10, 10~40, 40~100cm) に分けて 1 基 2 か所から採取した。なお、採取した試料の分析法は第 2 章と同様とした。

3. 結 果

1) 土壌溶液中の硝酸態窒素濃度

慣行施肥区における土壌溶液中の硝酸態窒素濃度の動きをみると、定植後の 4 月下旬までは、深さ 20cm の表層で $5 \sim 7\text{mg L}^{-1}$ 程度だったが、追肥施用が始まった 6 ~ 7 月にかけて $87 \sim 116\text{mg L}^{-1}$ にまで上昇した。根域下層部にあたる

深さ 70cm では、1994 年 8 月に 124mgL^{-1} 、1995 年 6 月に 73mgL^{-1} 、1996 年 7 月に 88mgL^{-1} とそれぞれ最高値を示した。9 月以降は、表層、下層とも $5 \sim 24\text{mgL}^{-1}$ にまで減少したものの、無肥料区の $1 \sim 12\text{mgL}^{-1}$ よりは高く経過した（第 3-3 表）。

2) 浸透水の硝酸態窒素濃度と窒素溶脱量

浸透水のイオン組成は、陽イオンとしてカルシウムが最も多く、アンモニウムは検出されなかった。陰イオンは硝酸、塩素、硫酸が主要な構成成分であり、リン酸も $1 \sim 4\text{mgL}^{-1}$ が検出された（第 3-4 表）。浸透水の無機窒素形態としては、硝酸が主要な成分であり、窒素の溶脱過程を検討するにあたっては、硝酸のみの追跡で解析可能であった。調査年における年間降水量は、1994 年と 1995 年が約 $1,900\text{mm}$ とほぼ平年並みの降水量を示し、1996 年は約 $1,500\text{mm}$ と冬期に少ない気象経過であった。浸透水量は 4 月から 10 月のナガイモ生育期において、各年とも降水量とかん水量の合計値の $63 \sim 67\%$ が排出し、休耕期にあたる 11 月から 3 月の冬期間は $88 \sim 92\%$ が浸透排出した。年間浸透水量は、1994 年が $1,988\text{mm}$ 、1995 年が $1,730\text{mm}$ 、1996 年が $1,330\text{mm}$ となり、 $70 \sim 76\%$ の排出割合を示した（第 3-5,6,7 表）。

慣行施肥区における浸透水の硝酸態窒素濃度は、年次差はあるものの夏期に高くなり冬期に低くなる経過を示した（第 3-1 図）。1994 年は 4 月から浸透水中の硝酸態窒素濃度が徐々に上昇し 7 月に 103mgL^{-1} と最高値を示した。1995 年も前年と同様に 7 月に最高となり 69mgL^{-1} を示した。また、1996 年は 6 月から 8 月に高まり $29 \sim 36\text{mgL}^{-1}$ で推移した。各年とも休耕期となる冬期に最低となり $3 \sim 6\text{mgL}^{-1}$ まで低下した。慣行施肥区の年平均硝酸態窒素濃度は、1994 年が 26.4mgL^{-1} 、1995 年が 28.9mgL^{-1} 、1996 年が 17.8mgL^{-1} となり水道水の水質基準値である 10mgL^{-1} よりかなり高かった。

無肥料区の硝酸態窒素濃度は、慣行施肥区より低いものの 1995 年 7 月に 43mgL^{-1} 、1996 年 6 月に 21mgL^{-1} の最高値を示した。

生育期における窒素の溶脱は、降水量やかん水量が多い時期に多くなる傾向にあった。慣行施肥において 1994 年は 8 月 22 日から 9 月 15 日にかけて 256Lm^{-2} が浸透排出し、この期間で年間溶脱量の 26% にもあたる量が溶脱した。1995 年は 7 月 1 日から 7 月 27 日にかけて平年の 2.3 倍に相当する 430mm の降雨があ

り、411mm が浸透して、この期間で年間溶脱量の 60% が溶脱した。1996 年は 5 月 29 日から 6 月 26 日にかけて 196Lm^{-2} が浸透排出し、この期間で年間溶脱量の 30% が溶脱した。年間の窒素溶脱量は 1994 年が 53gm^{-2} 、1995 年が 50gm^{-2} 、1996 年が 24gm^{-2} となり 4 ～ 10 月の生育期における溶脱量は、これら年間溶脱量の 77 ～ 89 % にものぼった。

^{15}N トレーサー法によって求めた浸透水中の施肥窒素の寄与率は、1995 年において施肥開始から徐々に高くなり 8 月に 46% と最大になった。その後は徐々に減少して 2 月には 9% にまで減少した。1996 年も前年と同様に 8 ～ 9 月に 46% と最大になり 2 月には 14% にまで減少した（第 3-2 図）。1 年間の窒素溶脱量に占める施肥窒素の割合は 1995 年が 33%、1996 年が 33% となり、それぞれ 16.2gm^{-2} 、 7.7gm^{-2} が施肥窒素の溶脱量と見積もられた。

3) ナガイモの窒素吸収量

ナガイモの乾物重は、慣行施肥区が $1.6 \sim 1.7\text{kgm}^{-2}$ となり一般栽培ほ場での作柄と同等の生育を示したのに対し、無肥料区は慣行施肥区の 38 ～ 40 % の乾物重にとどまり生育が劣った。ナガイモの窒素吸収量は、慣行施肥区が $26 \sim 28\text{gm}^{-2}$ 、無肥料区が $8 \sim 9\text{gm}^{-2}$ となり、施肥によって $18 \sim 20\text{gm}^{-2}$ の窒素吸収の増加が認められた（第 3-8 表）。

^{15}N トレーサー法によって求めた施肥窒素の寄与率は、1995 年が 61.0%、1996 年が 61.6% となり、それぞれ 16.1 、 17.3gm^{-2} が施肥窒素の吸収量と見積もられた。従って、施肥窒素の利用率は 41 ～ 43 % と推定された。

4) 土壌中における施肥窒素の残存量

供試土壌中には $284 \sim 292\text{gm}^{-2}$ の全窒素が存在した。 ^{15}N トレーサー法によって求めた施肥窒素寄与率は、表層で高く 0～10cm では 6 ～ 8%、10～40cm では 3 ～ 4%、40～100cm では 0.6～1.4% を示した。このことから施肥窒素は、0～100cm の土壌中に $5.6 \sim 7.3\text{gm}^{-2}$ が存在し、窒素施用量の 14 ～ 19 % に相当する量が残存していると見積もられた（第 3-9 表）。

4. 考 察

1) ナガイモ畑における施肥窒素の溶脱過程

砂丘ナガイモ畑に施用された窒素は、土壌中で硝酸態となりナガイモによる

吸収を経ながら、水の移動とともに根域下層に溶脱する。このような過程において、窒素溶脱量の多少に影響する要因としては、施肥窒素量および施肥法、ナガイモの窒素吸収量、土壌からの無機化窒素量、水の移動量が関与していると考えられる。

砂丘ナガイモ畑における窒素施肥は、元肥として4月に総施用量の10%を施用後、追肥として6月に26%、7月に38%、8月に22%、9月に5%を10回に分施するのが慣行となっており、栽培期間が長く、茎葉の伸長期に追肥をかさねるのが特徴といえる。一方、ナガイモの窒素吸収³⁷⁾は、茎葉が伸長し始める6月から増加し、茎葉繁茂最盛期の7月から8月にかけて最大となると考えられる。

このような施肥体系において、本試験の慣行施肥区における土壌溶液中の硝酸態窒素濃度の変化みると、追肥量が多くなる6月から濃度上昇が認められたが、7月下旬以降は比較的低濃度で推移していた。これは、ナガイモの根系拡大に伴う窒素吸収量の増加と降雨等の水移動によって、土壌中の窒素濃度が低下したためと考えられる。

慣行施肥区の窒素吸収量は、年次差が少なく施肥窒素利用率も41～43%とほぼ同じ値を示し、溶脱過程に違いが認められたにもかかわらず、ほぼ一定していた。これは、施肥法が分施回数が多いため、窒素溶脱の影響が短期間で回復し、窒素吸収に関しては供給状態に大きな差が生じなかったためと考えられる。

北海道における黒ボク畑のナガイモ栽培³⁷⁾では、標準施肥窒素量を 24gm^{-2} （目標窒素吸収量 10gm^{-2} ）とし、元肥主体で追肥を1～2回としており、砂丘畑の施肥法と大きな違いがある。本試験の窒素施用量は、黒ボク畑のナガイモ、その他一般野菜の施用量²⁸⁾ $20\sim 33\text{gm}^{-2}$ より多く、窒素吸収量も多くなっている。砂丘畑ナガイモの現行の施肥法は、生産安定には有利である反面、窒素溶脱に関しては栽培期間中において常に溶脱の危険があると判断される。

土壌からの窒素無機化量は、本試験では未測定であるが、無肥料区の濃度変化をみると生育初期の5月から6月に土壌中で濃度上昇が認められることから、地温の上昇とともに無機化量が増加すると考えられる。また、¹⁵Nトレーサー法による施肥窒素寄与率から、施肥窒素以外の吸収量として57～59%が

見込まれ、土壌からの窒素無機化量が施肥窒素量を上回っており、窒素溶脱に関しても量的には土壌窒素の無機化の影響が大きいことが示唆される。さらに、浸透水の硝酸態窒素濃度のピークと施肥窒素寄与率のピークを比較すると、約1か月の違いが認められ、施肥窒素寄与率のピークが遅れて現れている。これは、施肥窒素の供給様式と土壌窒素の発現様式の違いによるものと考えられ、5～6月の溶脱は土壌窒素の寄与が大きく、7～8月は施肥窒素の影響が大きくなることを示している。一方、浸透水における施肥窒素の影響は、施肥開始後から徐々に高まって8月頃に最大となり、その後は施肥窒素の溶脱割合が徐々に減少するものの、次年度の植え付け前においても溶脱窒素量の約10%が施肥窒素に由来しており、溶脱が激しいとされる砂質土においても施肥窒素の影響が、施肥終了後半年以上におよぶことが確認された。また、トウモロコシ栽培においても、窒素溶脱は栽培期間よりも非栽培期間に多くなるとする報告³⁸⁾もあることから、窒素溶脱を評価するには通年にわたる観測が重要である。

砂質土からの窒素溶脱は、水移動の影響が大きいことが指摘されている^{34,35,39)}。本試験においても、4月から10月の生育期間における窒素溶脱量は、浸透排出水量が多い年に多くなる傾向を示している。また、それぞれの年で溶脱量が最も多かった時期は、1994年が8月下旬から9月中旬、1995年が7月、1996年が6月と一定ではなかったが、いずれの期間も浸透水量が256mm、411mm、196mmと多かったことが共通している。

年毎の窒素溶脱過程を降雨パターン、土壌中の窒素濃度、窒素吸収についてみると、1994年は6月下旬から8月中旬に降水量が少なかったため、浸透水の硝酸態窒素濃度は徐々に高まったが、溶脱窒素量は比較的少なくなったと考えられる。その後、8月下旬から10月中旬は降水量が多かったため、土壌中に高濃度で存在していた窒素が、水移動とともに一度に溶脱したと考えられる。10月下旬以降は、溶脱によって土壌中の窒素濃度が低下したため、12月下旬から1月下旬に降水量が多かったが窒素溶脱量は少なくなった。

1995年は7月の梅雨期に連続降雨があったことにより、土壌中で徐々に蓄積されていた窒素が、この時期に一度に溶脱し、調査期間中で最も多い溶脱量を示す結果となったと考えられる。8月以降は、追肥による窒素の付加があったものの、ナガイモの窒素吸収の増加と降水量が少なかったため、窒素溶脱量

は翌春まで少なく経過した。

1996 年は 5 月まで降水量が少なく 6 月に入ってやや多い降水量があり、高まりつつあった土壌中の窒素が溶脱した。7～8 月は、空梅雨となり降水量が少なく、しかもナガイモの吸収量が多い時期であったことから窒素溶脱量は少なくなったと考えられる。その後、9 月にやや多い降水があったが、この時期には土壌中の窒素濃度が低下していたため窒素溶脱量は少なくなった。

以上のような溶脱経過から、生育期間に追肥を繰り返すナガイモ栽培において、土壌中に硝酸態窒素が増加する 6 月から 8 月に多量の水移動があると、溶脱量が著しく増加するものと考えられ、その年の降雨パターンやかん水量が溶脱量に大きく影響すると判断される。本試験においては、追肥回数が多いことや浸透水の採取が不定期的だったため、降雨強度や施肥時期との関連について、詳細な溶脱過程の解析はできないが、浸透水量として 1 か月に 200mm 程度の水移動があると土壌中の硝酸態窒素のほとんどが 1 m の土層から溶脱すると考えられる。

砂質土トウモロコシ畑では、灌漑によって施肥窒素の 73 % が溶脱したという報告⁴⁰⁾もあり、窒素溶脱は水管理の影響が大きいと考えられる。長井⁴¹⁾は、北条砂丘畑における慣行のかん水基準について調査検討し、生産されたナガイモの水分含量が高いことから、給水量が過多ではないかと指摘しており、肥料成分の流亡の増加を懸念している。本試験の結果からも、生育期間中の多量の降雨やかん水は、溶脱量を著しく増加させることが認められているので、溶脱量の減少には適正な水管理が重要と考えられる。また、肥料の種類については、佐藤ら³⁶⁾が被覆肥料の混用が溶脱量の減少に効果が期待できると述べているが、適正な溶出タイプや混合割合についてはさらに検討の余地があるとしている。砂丘ナガイモ畑における施肥窒素溶脱量の軽減には、今後これらの検討が急務であろう。

2) ナガイモ畑における窒素収支

ライシメーター試験で得られた結果は、調査年の降雨条件の影響が大きかったが、1994 年は無肥料区がないこと、1996 年は降水量が少ない年の結果であることから、平年並みの降水量であった 1995 年の結果をもとに、ナガイモ畑における窒素収支を示した（第 3-3 図）。

施肥窒素 39.6gm^{-2} は、土壌中に 5.6gm^{-2} が残存したことから、 34.4gm^{-2} が作物吸収や溶脱等に関与したと考えられる。供試土壌中の全窒素量は 284gm^{-2} であり、無肥料区の溶脱窒素量とナガイモの窒素吸収量から推定して、少なくとも 42.3gm^{-2} が土壌窒素からの無機化量と考えられる。従って、施肥窒素の有効化量と合わせて 76.7gm^{-2} が無機化窒素の合計量と推定される。土壌窒素の無機化量は、全窒素量の 1 ～ 5 % 程度とされ、無機化量として見積もった 1995 年の値は、全窒素量の 14.9 % に相当することから、やや過大な値とも考えられる。土壌窒素の無機化量については、むしろ 1996 年の値である 10.9gm^{-2} (全窒素量の 3.8 %) のほうが実態に近い値と考えられ、さらに検討する余地がある。

深さ 100cm の土層から溶脱する窒素量は 50.1gm^{-2} であり、そのうち施肥窒素に由来する窒素量は施肥窒素の 40.9% にあたる 16.2gm^{-2} である。無機化窒素のうちナガイモに吸収された窒素量は 26.4gm^{-2} で、このうち施肥窒素由来は 16.1gm^{-2} である。施肥窒素のナガイモに対する利用率は 40.7% となり、溶脱窒素量とほぼ同量の施肥窒素が吸収され则认为る。この他に窒素の動態として脱窒が考えられるが、本試験の場合 ^{15}N トレーサー法による施肥窒素の土壌残存量、溶脱量、吸収量の合計は施肥窒素量に対して 96% となったことから、測定誤差はあるものの、脱窒量は少ないものと推測できる。

なお、小雨年であった 1996 年 (浸透水量が 1995 年の 77 %) の収支は、1995 年に対し土壌残存量が 1.7gm^{-2} 、吸収窒素が 1.7gm^{-2} (肥料由来 1.2gm^{-2}) の増加となり、無機化窒素量が 25.0gm^{-2} 、溶脱窒素が 26.0gm^{-2} (肥料由来 8.5gm^{-2}) の減少を示し、施肥窒素溶脱率も 19.1 % に減少した。この年次差は、降雨パターンの影響が大きいと考えられ、浸透水量の低減が溶脱量の減少に効果が高いことを示している。

黒ボク畑において野菜を中心とした輪作下での窒素収支を求めた事例⁴²⁾では、施肥窒素 34gm^{-2} で溶脱窒素量 7.6gm^{-2} (肥料由来 7.1gm^{-2})、吸収窒素量 25gm^{-2} (肥料由来 19gm^{-2})、脱窒等 1.7gm^{-2} と推定している。これに比べると、本試験の砂質土の収支は、吸収量が少なく溶脱量が多い結果となっており、作物は異なるものの、土壌特性の違いの影響が大きいと判断される。

既往のライシメーター試験の多く^{33,35)}は、無肥料区の結果を差し引いて収支を求めたり、施肥窒素量に対する溶脱量 (施肥窒素 + 土壌窒素) を溶脱量とし

て算出している。本試験では、¹⁵Nトレーサー法を用いて施肥窒素の収支をより明確に試算した。その結果、溶脱窒素に占める当年の施肥窒素の割合は33%程度であり、施肥以外の影響も大きいことが明らかにできた。

近年、同位体自然存在比を用いた溶脱窒素の起源推定⁴³⁾も試みられており、今後、溶脱窒素の軽減を検討するにあつたては、施肥窒素の寄与を明確にすることが重要であると考えられる。

第3-1表 ナガイモのライシメーター試験における供試土壌の理化学性

土色	土性	pH	全窒素	CEC	交換性塩基含量 (cg kg ⁻¹)			Truog P ₂ O ₅
		(H ₂ O)	(g kg ⁻¹)	(cmol (+) kg ⁻¹)	CaO	MgO	K ₂ O	(cg kg ⁻¹)
10YR5/3	S	6.3	0.198	4.3	40.3	11.2	5.5	55.0

第3-2表 ナガイモの栽培概要と窒素施用法

管理項目	管 理 内 容	施肥処理日 (月/日)		
		1994年	1995年	1996年
土壌消毒	3月下旬にバスアミド微粒剤を土壌混合後、ビニールで被覆し、2週間後にガス抜きのために耕耘			
元肥施用	4月下旬に尿素化成 IBS-1 (10-10-10) 4.0Ngm ⁻² を施用	4/14	4/24	4/28
種芋定植	1基あたり3株 (種芋重100g) を深さ10cmに定植			
追肥施用	6月上旬：尿素燐加安 (18-8-16) 3.6Ngm ⁻²	6/6	6/5	6/3
	6月中旬：ナガイモ複合 (12-15-18) 1.8Ngm ⁻² と尿素化成3.0Ngm ⁻²	6/14	6/20	6/21
	6月下旬：ナガイモ複合1.8Ngm ⁻²	6/29	6/28	6/28
	7月上旬：尿素燐加安3.2Ngm ⁻² とナガイモ複合1.8Ngm ⁻²	7/6	7/3	7/4
	7月中旬：尿素燐加安3.2Ngm ⁻² とナガイモ複合1.8Ngm ⁻²	7/18	7/18	7/19
	7月下旬：尿素燐加安3.2Ngm ⁻² とナガイモ複合1.8Ngm ⁻²	7/25	7/27	7/26
	8月上旬：尿素燐加安3.2Ngm ⁻² とナガイモ複合1.8Ngm ⁻²	8/5	8/11	8/6
	8月中旬：ナガイモ複合1.8Ngm ⁻²	8/15	8/21	8/23
	8月下旬：ナガイモ複合1.8Ngm ⁻²	8/25	8/30	8/30
	9月上旬：ナガイモ複合1.8Ngm ⁻²	9/5	9/8	9/10
	(慣行施肥区の窒素施用量合計：39.6Ngm ⁻²)	(施肥回数：11回)		
収穫	11月上旬に掘り上げ、茎葉、芋、土壌を採取			

第3-3表 土壌溶液中の硝酸態窒素濃度の経時変化 (mgL⁻¹)

採取位置 處理区分 (cm)		1994年					1995年					1996年					(月/日)				
		5/12	6/20	7/19	8/18	9/19	10/18	4/24	5/29	6/20	7/20	8/22	9/24	10/1	4/25	5/10		6/12	7/23	8/30	9/20
無肥料区	20	-	-	-	-	-	-	9	24	20	7	8	1	4	8	20	26	5	2	2	3
	70	-	-	-	-	-	-	10	30	72	12	12	1	8	9	26	29	17	1	4	3
慣行施肥区	20	2	33	91	62	8	5	5	22	116	10	11	22	13	7	25	87	29	23	24	21
	70	15	76	75	124	9	18	14	59	73	54	8	4	9	10	21	44	88	26	23	16

注) 1994年無肥料区は未測定

第3-4表 浸透水のイオン組成

処理区分	採水時期 (年. 月. 日)	浸透水のイオン濃度 (mgL ⁻¹)							
		K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
無肥料区	1996. 3. 18	4. 7	18. 3	4. 5	n. d.	18. 2	21. 1	1. 05	11. 7
	1996. 6. 26	10. 8	31. 8	9. 1	n. d.	97. 7	8. 3	1. 02	54. 5
	1996. 9. 12	7. 8	17. 9	4. 5	n. d.	8. 5	18. 5	4. 44	9. 6
慣行施肥区	1996. 3. 18	8. 2	21. 0	4. 8	n. d. [*]	28. 2	21. 2	0. 92	15. 1
	1996. 6. 26	18. 9	63. 2	18. 3	n. d.	193. 9	15. 4	0. 12	150. 4
	1996. 9. 12	14. 3	42. 4	12. 3	n. d.	93. 3	18. 6	3. 19	20. 7

* n. d. は0. 01mgL⁻¹以下にあり検出されなかったことを示す.

第3-5表 ライシメーターにおける窒素溶脱量 (1994年4月～1995年3月)

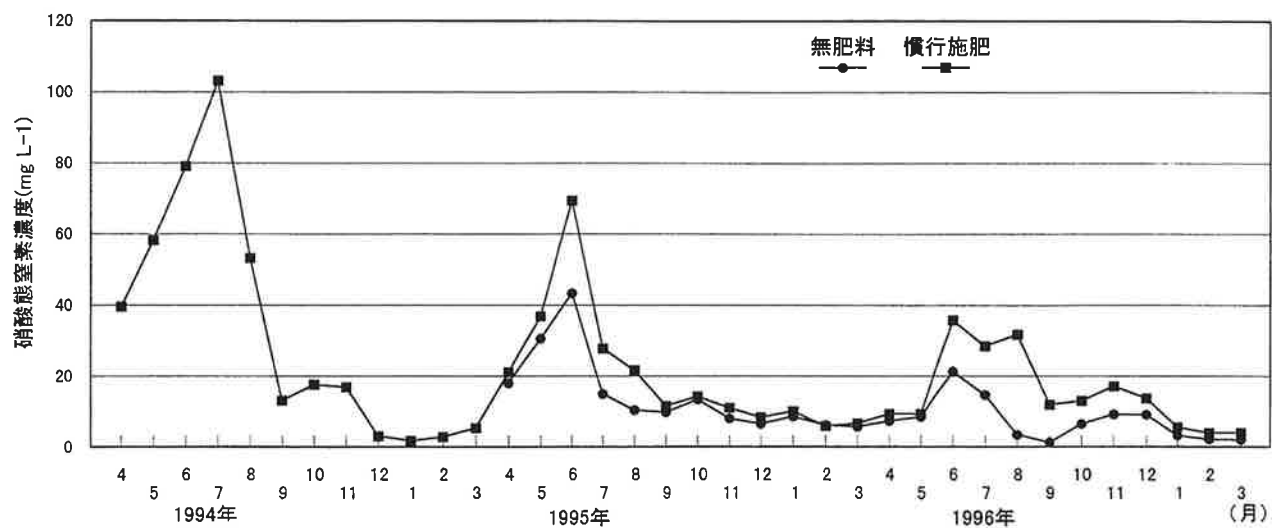
項目	処理区分	期間合計														合計
		4/8 5/11	5/12 6/19	6/20 7/11	7/12 8/21	8/22 9/15	9/16 10/20	10/21 11/16	11/17 12/16	12/17 1/27	1/28 2/15	2/16 3/15	3/15(月) 4/10	4~10月	11~3月	
窒素溶脱量 (g m^{-2}) 慣行施肥区																
降水量 (mm)		124	84	75	60	212	238	106	151	390	170	126	129	793	1,072	1,865
かん水量(mm)		0	129	79	201	230	129	0	0	0	0	0	0	769	0	769
平均排出水量 (mm)		117	138	114	68	256	330	91	122	368	161	118	107	1,022	966	1,988
排出割合 (%)		94	65	74	26	58	90	86	81	94	95	94	83	65	90	76
														46.7	6.0	52.7
合計																

第3-6表 ライシメーターにおける窒素溶脱量 (1995年4月～1996年3月)

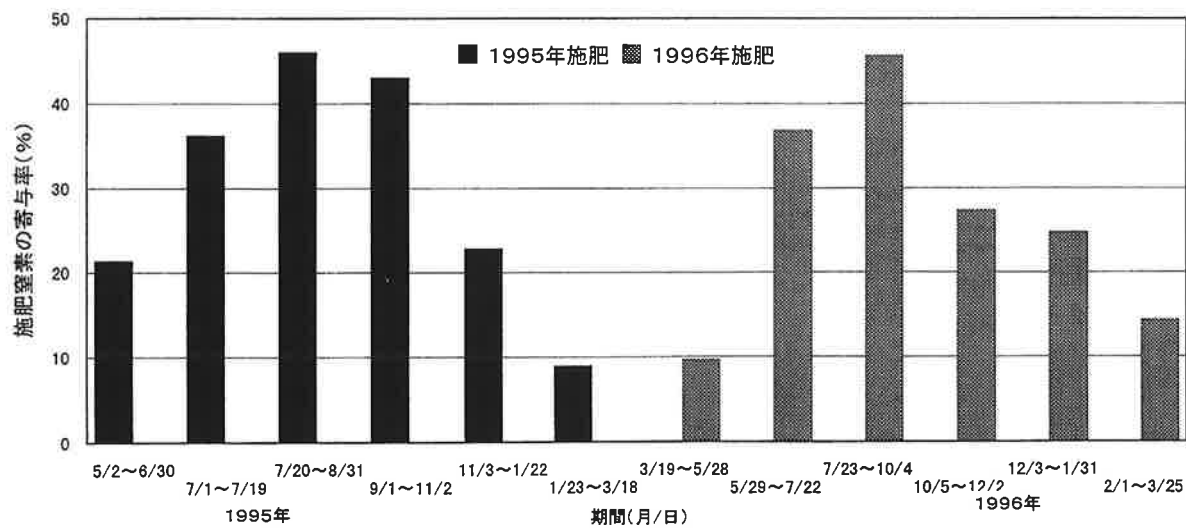
項目	処理区分	期間合計														合計
		4/11 5/29	5/30 6/30	7/1 7/27	7/28 8/31	9/1 10/11	10/12 11/2	11/3 11/24	11/28 12/18	12/19 1/5	1/6 2/14	2/15 3/18	3/19(月) 4/9	4~10月	11~3月	
窒素溶脱量 (g m^{-2})	無肥料区	5.6	1.8	18.7	1.4	0.8	0.2	0.5	1.8	0.8	1.5	1.1	0.2	28.5	5.8	
	慣行施肥区	6.5	2.2	29.9	2.6	1.7	0.2	0.5	2.5	1.0	1.8	1.0	0.2	43.1	7.0	
降水量 (mm)		324	42	430	94	110	27	52	236	133	188	177	46	1,026	832	
かん水量 (mm)		16	39	32	258	55	16	0	0	0	0	0	0	414	0	
平均排出水量 (mm)		307	60	411	95	78	17	34	224	123	176	171	36	968	762	
排出割合 (%)		91	75	89	27	47	41	66	95	92	93	96	78	67	92	

第3-7表 ライシメーターにおける窒素溶脱量 (1996年4月～1997年3月)

項目	処理区分	4/10	5/8	5/29	6/27	7/23	8/31	10/5	11/6	11/21	12/21	2/1	3/4	期間合計		合計
		5/7	5/28	6/26	7/22	8/30	10/4	11/5	11/20	12/20	1/31	3/3	4/3	4~10月	11~3月	
窒素溶脱量 (g m^{-2})	無肥料区	0.4	0.3	4.2	1.5	0.4	0.3	0.7	0.2	0.8	0.7	1.1	0.4	7.8	3.1	10.9
	慣行施肥区	0.5	0.3	7.0	3.0	3.3	2.4	1.6	0.4	1.3	1.1	2.0	0.7	18.2	5.6	23.7
降水量 (mm)		78	46	235	102	124	194	151	51	123	131	195	89	931	588	1,520
かん水量 (mm)		0	0	39	63	211	63	0	0	0	0	0	0	375	0	375
平均排出水量 (mm)		58	33	196	106	104	198	120	24	118	120	188	65	815	515	1,330
排出割合 (%)		74	72	71	80	31	77	79	48	96	92	96	73	63	88	70



第3-1図 浸透水中の硝酸態窒素濃度の推移



第3-2図 浸透排水中の施肥窒素寄与率の変化

第3-8表 ナガイモの収量と窒素吸収量

試験年次	区分	ナガイモ乾物重 (kgm ⁻²)	窒素吸収量 (gm ⁻²)	施肥窒素 寄与率* (%)	施肥窒素 吸収量 (gm ⁻²)	施肥窒素 利用率** (%)
1994年	慣行施肥区	1.65	27.4	—	—	—
1995年	無肥料区	0.64	8.0	—	—	—
	慣行施肥区	1.59	26.4	61.0	16.1	41.0
1996年	無肥料区	0.65	8.5	—	—	—
	慣行施肥区	1.73	28.1	61.6	17.3	43.4

* 施肥窒素寄与率(%) = ナガイモの¹⁵Natom%excess ÷ 肥料の¹⁵Natom%excess × 100

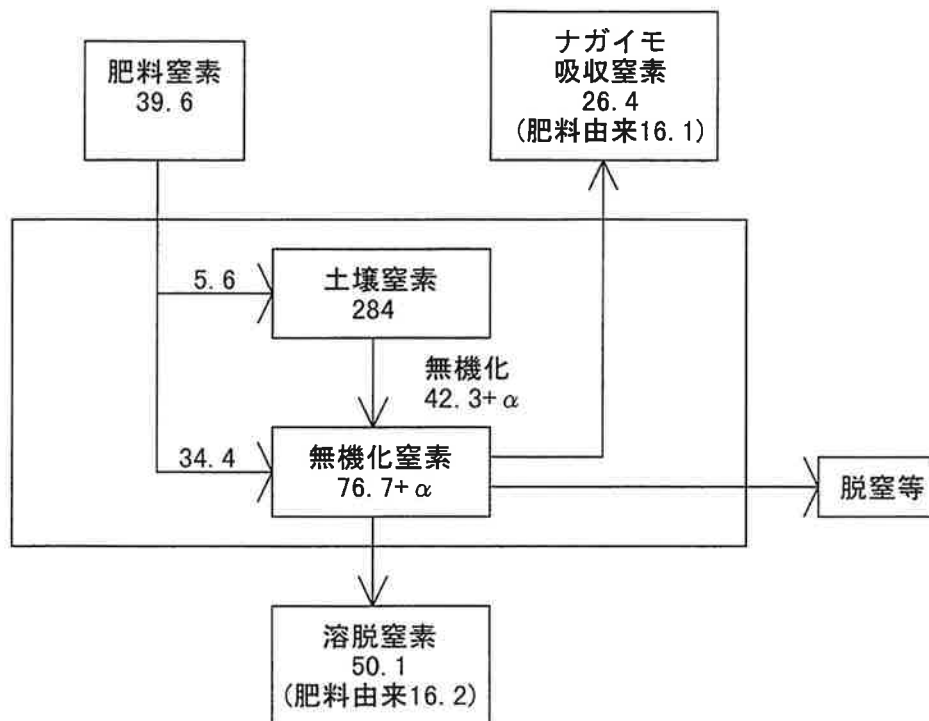
** 施肥利用率 = 施肥窒素吸収量 ÷ 窒素施用量 × 100

第3-9表 施肥窒素の土壌残存量

調査年	採取 位置 (cm)	全窒素量		施肥窒素寄与率* (%)	施肥窒素残存量** (gm ⁻²)
		(mgkg ⁻¹)	(gm ⁻²)		
1995年	0~10	180	26.0	6.01	1.56
	10~40	208	80.1	3.62	2.90
	40~100	231	178.0	0.64	1.14
計(平均)		(209)	284.1	(1.97)	5.60
1996年	0~10	204	29.5	8.05	2.37
	10~40	222	85.5	2.89	2.45
	40~100	230	177.2	1.42	2.52
計(平均)		(225)	292.2	(2.51)	7.34

* 施肥窒素寄与率(%) = 土壌の¹⁵Natom%excess ÷ 施肥した窒素の¹⁵Natom%excess × 100

** 施肥窒素残存量 = 土壌の全窒素量 × 施肥窒素寄与率(%) ÷ 100



第3-3図 ナガイモ栽植ライシメーターにおける窒素収支 (N gm^{-2})

第4章 ナシ園における窒素溶脱

鳥取県中部の大山山麓地帯では、丘陵地にナシ、シバ、スイカが栽培され、平野部にかけて水田地帯が分布し、海岸部の砂丘地帯のナガイモに至る作物連鎖系を形成している。この地帯における畑地での施肥窒素の溶脱を検討するにあたっては、丘陵地に分布するナシに対する施肥窒素の動向を把握することが重要と考えられる。果樹についてはこれまでに数種の樹種についてライシメーター試験^{44) ~ 53)}が実施され、肥料成分の流出や水分変動が調べられているが、樹体が大きいかことや生育が長期間に及ぶこともあって、窒素溶脱に関する解析は十分には行われていないのが現状である。そこで、本研究ではナシを対象にライシメーター試験を行い、施肥窒素の溶脱過程を明らかにした。

第1節 黒ボク土ナシ園における窒素溶脱

1. 目的

鳥取県におけるナシの主要品種である二十世紀は、ほぼ県下全域で栽培されておりその土壌条件もさまざまである。県の東部は古生層や第三紀層に由来する土壌が多い。中部から西部にかけては大山火山灰に由来する黒ボク土での栽培が多く、全栽培面積の約50%を占めている。

ナシに対する施肥は、年間施肥窒素量として $150 \sim 250 \text{ kg ha}^{-1}$ が施用され、9月下旬に年間施用量の30%、12月に50%、3月上旬に10%、6月上旬に10%を分施するのが基本になっている⁵⁴⁾。そこで、ナシ園における窒素溶脱の実態を把握するため、鳥取県中部地域におけるナシ園の主要な土壌である黒ボク土について、根域下層に溶脱する窒素の濃度と時期変化、年間の窒素溶脱量と窒素収支をライシメーター試験によって明らかにした。

2. 材料および方法

1) 供試ライシメーターの構造

本試験では縦3m、横3m、深さ1.5mのコンクリート製ライシメーターを用いた。底部には深さ10~20cmに碎石を敷きつめ、その上に供試土壌を1mの深さに充真した。浸透水は地下の貯水槽に貯え、排水口へ導く構造となつて

おり，末端に流量計を取り付け，20 ～ 30mm の降水毎にバルブを開閉して浸透水を排出した．

2) 供試土壌および施肥法

供試土壌は，赤碕町で採取した大山上部火山灰⁵⁵⁾に由来する土壌を用い，1979年11月に2年生二十世紀を各基に1樹ずつ植え付け，1年間養成の後，施肥処理を開始した．なお，供試土壌の理化学性を第4-1-1表に示した．肥料としては，リン酸2アンモニウム系高度化成肥料であるリン加安S550（N 15%， P_2O_5 15%， K_2O 10%）を用い，年間窒素施用量を150 gとして，3月上旬10%，6月上旬10%，9月下旬30%，12月上旬50%，に分施した（第4-1-2表）．なお，ライシメーターは3基を供試し，地表面は清耕状態とした．調査は1980年10月から1985年9月までの5年間にわたって実施した．

また，前記の調査は無肥料区を設置していなかったため，無肥料条件での窒素溶脱量は評価できない．そこで，ナシ樹堀上げ後の1994～1996年の3年間，同一ライシメーターを用い，無肥料で植生のない条件において，同様に浸透水の窒素濃度を測定して窒素溶脱量を求めた．

3) 調査方法

浸透水は，採取毎に直ちにイオン電極法によって硝酸態窒素濃度を求めた．土壌は1980年9月と1985年10月に採取して全窒素含量を測定した．また，深さ0～10cmの土壌を月毎に採取して水分を最大容水量の60%に調整し，ポリエチレン袋に入れ深さ10cmに埋設し，窒素無機化量の変化を測定した．

果実収量は，毎年9月に全果実を収穫して重量を測定した．樹体生育は，発育枝伸長量を毎年11月に，30 cm以上伸長した発育枝の数と長さを測定した．また，1985年10月に供試樹を解体し，葉，枝，幹，根に分けて重量を測定後，その一部を粉砕して分析用試料とした．

3. 結 果

1) 浸透水量

調査地点の過去10年間の年平均降水量は1,845mm（16,605 L基⁻¹）であり，調査期間においては，1981年から1983年が1,798～1,843mmでほぼ平年並の降水量となった．1984年は1,680mmであり，冬期に多雨で夏期に少雨となった．1985

年は 2,179mm の降水量となり、最も多雨に経過した。降水量とかん水量を合わせた流入水量は、1981 年から 1983 年が 16,180 ～ 16,594 L 基⁻¹ とほぼ同量となり、1984 年は冬期に降水量が多かったため 18,333 L 基⁻¹ と多くなり、1985 年は多雨によって 22,721 L 基⁻¹ と最も多くなった(第 4-1-3 表)。浸透水量は 6,939 ～ 13,739 L 基⁻¹ と大きな年次変動があったが、排出割合は 42.9 ～ 60.5 % となり、年次変動は少なくなった。5 年間の平均排出割合は 52.8 % となり、流入水量の約半量が浸透水となった。月毎の浸透水量は、流入水量の多少により大きく変動し(第 4-1-1 図)、降雪の多い冬期と梅雨期に多く、晴天が続いた夏期から秋期に少なくなる傾向にあった。

2) 浸透水の硝酸態窒素濃度

浸透水中の窒素組成は、硝酸態が主要なイオンであり、アンモニア態は常に未検出(0.1mgL⁻¹ 以下)であった。浸透水の硝酸態窒素濃度は、冬期の 12 ～ 1 月に緩やかに増加が始まり、春期にかけて増加が続いた。ピーク時期とその濃度は、1981 年が 4 月に 55.7mgL⁻¹、1982 年が 1 月に 17.5mgL⁻¹、1983 年が 4 月に 48.9mgL⁻¹、1984 年が 5 月に 17.4mgL⁻¹ と 8 月に 22.0mgL⁻¹、1985 年が 3 月に 19.8mgL⁻¹ となった。その後、収穫期の 9 月には各年とも濃度が減少して 10 ～ 11 月に 1.6 ～ 2.8mgL⁻¹ と最低値を示した。

1981 ～ 1985 年の平均濃度は 12.4mgL⁻¹ となり、調査初年に 26.7mgL⁻¹ と高かったものの、2 年目以降は 6.8 ～ 13.0mgL⁻¹ にほぼ一定していた。

3) 窒素溶脱量

窒素溶脱量の多かった時期は、浸透水の窒素濃度が高く浸透水量が多い期間であった。各年の窒素溶脱量の多かった時期についてみると、1981 年 4 月は、窒素濃度がピークに達し浸透水量も多い時期であり、窒素溶脱量が最も多かった。1982 年は、3 月にやや高い窒素濃度とやや多い浸透水量があったことによって窒素溶脱量が多くなった。1983 年 3 ～ 4 月は、窒素濃度のピーク期に当たったため、浸透水量は平年並みだったものの窒素溶脱量が多くなった。1984 年は窒素溶脱量の少ない年であったが、1 ～ 5 月に濃度が高まって、平年並みの浸透水量があり溶脱窒素量がやや多くなった。1985 年は、1 ～ 5 月に窒素濃度が高まりやや多い浸透水量があったため溶脱量が多くなった。年次変動はあるものの、ナシ園において 1 ～ 5 月に窒素溶脱が多くなる傾向にあった。

5 年間に浸透排出した窒素溶脱量は、 589 g 基^{-1} となり、施肥窒素量 750 g 基^{-1} の 78.5 % に相当する量となった。年次別にみると、調査初年の 1981 年に多く、その後はその年の浸透水量にほぼ比例した変動を示した。

4) 樹体生育と果実収量

供試ナシ樹の生育は、1981 ～ 1982 年にかけてナシの樹冠拡大に伴って増大したが、1983 年以降はほぼ一定となった。新梢の伸長量は 1992 年までは増加したが、1983 年以降は $73.6 \sim 78.5 \text{ m 基}^{-1}$ とほぼ一定となった（第 4-1-4 表）。また、果実収量も 1983 年以降は、 $51.9 \sim 52.8 \text{ kg 基}^{-1}$ に一定した。

5) ナシ樹の窒素吸収量

1985 年に解体した供試樹の乾物重は 33.9 kg 基^{-1} であり、1984 年までの果実、落葉、せん定枝の 37.7 kg 基^{-1} と合わせて 71.6 kg 基^{-1} が 1985 年までの総樹体乾物重となった（第 4-1-5 表）。窒素吸収量は、それぞれ 302.5 g 基^{-1} 、 249.5 g 基^{-1} 、合計 552.0 g 基^{-1} と見積もられ、1 年間の窒素吸収量は、 110.4 g 基^{-1} であった。

6) 土壌からの窒素無機化量

ポリエチレンバッグ法によって測定した月毎の硝酸態窒素の増加量は、地温の上昇とともに増加して 8 月に最大となり、秋にかけて減少する変化を示した。5 ～ 10 月までの合計は、 27.0 mg kg^{-1} となった（第 4-1-6 表）。

ナシ無栽植無肥料条件における浸透水量、硝酸態窒素濃度、窒素溶脱量の変化を第 4-1-2 図に示した。浸透水の硝酸態窒素濃度は、1994 年 10 月、1995 年 11 月、1996 年 10 月に最高値を示し、それぞれ 13.6 mg L^{-1} 、 22.0 mg L^{-1} 、 15.2 mg L^{-1} となった。また、最低値は 1994 年 6 月、1995 年 3 月、1996 年 4 月に、それぞれ 4.8 mg L^{-1} 、 2.0 mg L^{-1} 、 2.9 mg L^{-1} となり、3 年間での平均濃度は 10.2 mg L^{-1} となった（第 4-1-7 表）。土壌窒素の溶脱は、施肥条件と同様に浸透水の窒素濃度が高く、浸透水量の多い時期に多かった。しかし、溶脱の時期は施肥条件と異なり、夏期から初冬期の 7 ～ 1 月にかけて多くなった。ナシ無栽植無肥料条件での窒素溶脱量は、1 年間で $151.5 \sim 190.2 \text{ g 基}^{-1}$ となり、ナシ植栽条件での値を上回る量となった。

7) 土壌全窒素含量の変化

継続処理 5 年目における土壌の全窒素含量は、表層で高く下層ほど少なくなる傾向にあった（第 4-1-3 図）。ライシメーター内の全窒素含量は、1980 年に

比べ5年後には 1.26kg 基^{-1} の減少が認められた。(第4-1-8表)。

4. 考 察

1) ナシ園における窒素の溶脱過程

浸透水に含まれる窒素は、施肥により供給されたもの、土壌窒素の無機化によるもの、その他雨水中に含まれるものや落葉から再供給されるもの等が含まれその合量が負荷量となっている。そして、ナシ樹による窒素吸収、土壌中における脱窒を経た後、根域下層に移動したものが溶脱窒素となっている。また、土層中での移行速度は水の移動量や土壌粒子との吸着力によって律速されている。

リンゴを用いたライシメーター試験⁵⁶⁾によると、施肥窒素量 10gm^{-2} (化成肥料) に対して窒素溶脱量が、岩木山系火山灰土壌で 10.4gm^{-2} と多く、埴質沖積土壌で 6.4gm^{-2} と少ないとしており、土壌窒素の多少が窒素溶脱量に影響した事例と判断できる。また、ウメを用いたライシメーター試験⁵⁷⁾では、施肥窒素量 12gm^{-2} に対して窒素溶脱量が、中粗粒質土壌で 5.3gm^{-2} と多く、細粒質土壌で 1.7gm^{-2} と少なくなるとしており、土壌の透水性や吸着力の差の影響が大きいことも指摘されている。さらに、ブドウを用いたライシメーター試験⁴⁶⁾によると、黒ボク土の窒素溶脱量は施肥窒素量の5%で花崗岩質土壌の19%に比べ少なく、試験開始後の2年間はほとんど溶脱が認められなかったとしており、施肥半年後に溶脱量が多くなる花崗岩質土壌に比べ、黒ボク土は複雑な溶脱過程を示すとしている。このように、果樹では窒素溶脱に及ぼす影響は、土壌の種類や樹種によって様々な要因が関与していると考えられる。

ここでは、黒ボク土ナシ園における施肥窒素と土壌窒素の影響を中心に考察する。施肥窒素量は1年に 16.7gm^{-2} であり、施肥後は窒素の形態が施用時のアンモニア態から硝酸態へ変化し移行する。硝酸化の速度は、施用時の地温によって影響され、地温の高い6月、9月、3月、12月の順に早いと考えられる。ナシ園において施肥後の土壌溶液中の窒素濃度上昇を調査した結果^{58,59)}によると、主要根群域中央部にあたる深さ20cmでは、6月施肥で22日後、9月施肥で34日後、3月施肥で58～80日後、12月施肥で93～147日後に濃度ピークを示し、ピークを示す時期が遅いほど濃度が低くなるとしている。また、施肥

窒素が根域下層（深さ 60cm）に達するまでに必要な降水量は、最も早い 6 月施肥で 400 ～ 600mm，秋期及び冬期で 600 ～ 700mm と推定され，期間として 2 ～ 4 か月を要するとしている．このことから本試験においては，浸透水が得られる深さ 100cm に移行窒素のピークが達するまでには，約 1,000mm の降水量が必要と考えられる．

それぞれの年における 10 月からの積算降水量は，1981 年が 5 月までに 1,078mm，1982 年が 4 月までに 999mm，1983 年が 4 月までに 1,034mm，1984 年が 3 月までに 1,081mm，1985 年が 5 月までに 1,050mm であることから，9 月下旬および 12 月上旬の施肥窒素が，浸透水の窒素濃度に大きく影響する時期は，3 ～ 5 月頃と推定できる．測定結果から得られた濃度ピーク期は，1 ～ 5 月であり，年次により 1 ～ 2 か月の早晩は認められるものの，ほぼ想定される時期に濃度上昇を示したことから，黒ボク土ナシ園における 9 月下旬および 12 月上旬の施肥窒素は，冬期から春期にかけて浸透水の硝酸態窒素濃度の上昇に大きく影響すると推察される．

小松ら⁶⁰⁾は初冬期に施用した窒素肥料は，翌年の生育期までに多くが根域下層に移行すると指摘している．本ライシメーター試験の結果においても，年間の窒素溶脱量に対する 1 ～ 5 月の溶脱割合は，生育の安定した 1983 ～ 1985 年に 72.0 ～ 80.9 % を占め，秋期から冬期の施肥による溶脱の多いことが確認された．従って，黒ボク土ナシ園における施肥窒素溶脱の軽減には，秋期から冬期の施肥改善が有効であると考えられる．

一方，土壌窒素の溶脱の影響についてみると，ナシ無栽植無肥料条件における浸透水の窒素濃度ピークは，ナシ栽植施肥条件の 1 ～ 5 月とは異なり 10 ～ 11 月にあったことから，ポリエチレンバッグ法によって認められたように，春期から夏期にかけて無機化した窒素が徐々に移行して溶脱したものと考えられる．

各年のナシ無栽植無肥料条件における窒素溶脱量は，夏期から冬期にかけて多く，7 ～ 12 月で年間溶脱量の 65.7 ～ 80.8 % が浸透排出しており，この時期に土壌窒素に由来する溶脱が多くなると判断できる．黒ボク土における 1 年間の土壌窒素無機化量は，窒素溶脱量が 18.3gm^{-2} であったことから，通常のナシの施肥窒素量を上回る量が無機化していると推定される．浦木ら⁶¹⁾が ^{15}N を用

いて黒ボク土におけるナシ樹の窒素吸収割合を測定した結果によると、施肥窒素の割合は 35 %と低く、土壌窒素の影響が大きいとしている。このことは、黒ボク土では施肥窒素よりも土壌窒素からの窒素の無機化が多いことを意味しており、窒素溶脱に対しても土壌窒素の影響が大きいと思われる。

ナシ栽植施肥条件では、春期から夏期には土壌窒素の無機化と 3 月上旬および 6 月上旬の施肥窒素による影響が重なって現れると考えられる。しかし、この時期は施肥窒素量が少なくナシ樹による吸収も多いため、7 ～ 12 月における窒素溶脱量は、年間施肥窒素量の 5.6 ～ 29.5 %に相当する量のみであり、1 ～ 5 月の溶脱量に比べかなり少なく、窒素溶脱への影響は少ないと考えられる。

これらのことから、黒ボク土ナシ園においては、秋肥および冬肥として施用された年間施用量の 80 %にあたる施肥窒素が、冬期から翌春に根域下層に達し、1 ～ 5 月にその多くが溶脱することが明らかとなった。また、春肥および夏肥として施用された窒素は、土壌無機化窒素とともに夏期から冬期にかけて溶脱するが、前者に比べ溶脱量は少なく、施肥窒素の溶脱は秋肥および冬肥の影響が大きいと判断された。さらに、黒ボク土における土壌窒素からは、施肥窒素量を上回る無機化量が見積もられ、裸地条件や幼齢期のナシ園では窒素溶脱の増加に影響する可能性が示唆された。

2) ナシ園における窒素収支

得られた数値をもとに黒ボク土ナシ栽植ライシメーターにおける窒素収支を推定した（第 4-1-4 図）。

インプットとしては、施肥によって 1 年間に 16.7gm^2 の窒素が入る。その他に雨水と樹体からの離脱物が入ることとなるが、その主体は落葉であり、リターとして落葉の 50%が入るとして加算する。雨水（平均全窒素濃度 0.86mgL^{-1} ）からは 1.8gm^2 、落葉からは 1.2gm^2 が系内にはいると試算できる。アウトプットとしては、ナシ樹の窒素吸収量と硝酸態窒素の溶脱量を当てることとし、それぞれ 12.3gm^2 、 13.1gm^2 となる。土壌窒素は $2,259\text{gm}^2$ であり、土壌窒素の無機化量としては、ナシ無栽植無肥料条件での窒素溶脱量 18.4gm^2 が最小値として見積もられる。付加窒素の無機化量は不明であるが、ここでは化成肥料と雨水中の窒素無機化率を 90 %、リターの無機化率を 50 %と仮定すると、無機化窒素量へは 17.3gm^2 、土壌窒素へは 2.4gm^2 の分配が推定できる。したがって、無

機化窒素の含量は少なくとも 35.7gm^{-2} と推測できる．この無機化窒素量には，施肥窒素から 15.0gm^{-2} が含まれている．無機化窒素の溶脱割合は，実測値から 37 % 以下と見積もることができる．従って，施肥窒素の溶脱量は 5.6gm^{-2} 以下と推定され，最大値として施肥窒素量の 34 % が溶脱すると予想できる．さらに，果樹の施肥窒素利用率は 30 ～ 50 % 程度が多いとしていることから，施肥窒素利用率を 40 % と仮定すると，施肥窒素吸収量は 6.7gm^{-2} となり，残りの 4.4gm^{-2} は土壌残存と脱窒と推定できる．

果樹園の窒素収支について詳細に検討した報告例は少ない．¹⁵ Nを用いたリンゴ園における施肥窒素の動態解析⁶²⁾ (20Ngm^{-2}) によると，吸収窒素は施肥窒素由来が 22.5 % であり，土壌窒素の影響が大きかったとしている．また，駒村⁶³⁾が落葉果樹での¹⁵ Nを用いた試験例をとりまとめた結果によると，施肥窒素由来はブドウで 25 ～ 56 %，モモで 30 ～ 48 %，リンゴで 19 ～ 42 % であり，吸収窒素の半分以上は土壌窒素由来としている．さらに，草生ミカン園⁶⁴⁾ (21Ngm^{-2}) での調査では，施肥窒素の吸収率は 37.9 % であり，52.7 % が溶脱，脱窒，土壌残存量と推定している．溶脱窒素における施肥窒素の寄与について測定された事例はなく，本試験においても¹⁵ Nを用いていないため，窒素の給源については明確ではない．しかし，窒素収支において推定した値は，既往の成績と比べても大きな不都合はなく，ほぼ妥当な範囲の値と考えられる．

いずれにせよ，ナシ樹を栽植したライシメーター試験によって，窒素溶脱は土壌窒素の影響が大きいこと，施肥窒素の溶脱は秋期から冬期に施用した肥料の影響が大きく，翌春の 1 ～ 5 月にかけて溶脱していることが確認された．窒素の溶脱軽減には，秋冬期の施肥法を改善することが有効であると判断される．また，得られた結果は，土壌窒素発現量の多い黒ボク土において，溶脱しやすい化成肥料を用いた結果である．窒素溶脱量は，土壌の種類，肥料の形態，施肥窒素量，施肥時期，地表面管理様式等によって変動することが考えられるので，それぞれについての検討が必要であろう．

第4-1-1表 供試土壌の理化学性

土色	土性	pH (H ₂ O)	全窒素 (g kg ⁻¹)	CEC (cmol (+) kg ⁻¹)	交換性塩基含量 (cg kg ⁻¹)			Truog P ₂ O ₅ (cg kg ⁻¹)
					CaO	MgO	K ₂ O	
7.5YR3/6	SiC	5.3	3.80	37.1	103	32	72	19.8

第4-1-2表 黒ボク土ナシ栽植ライシメーター試験における窒素施肥法(1980～1985年)

項 目	施 肥 時 期				計
	3月上旬	6月上旬	9月下旬	12月上旬	
窒素施用量 (g基 ⁻¹)	15	15	45	75	150 (16.7gm ⁻²)

注) 肥料はリン酸2アンモニウム系の高度化成肥料(15-15-10)を使用.

第4-1-3表 黒ボク土ナシ栽植ライシメーター試験における浸透水量，硝酸態窒素濃度，窒素溶脱量

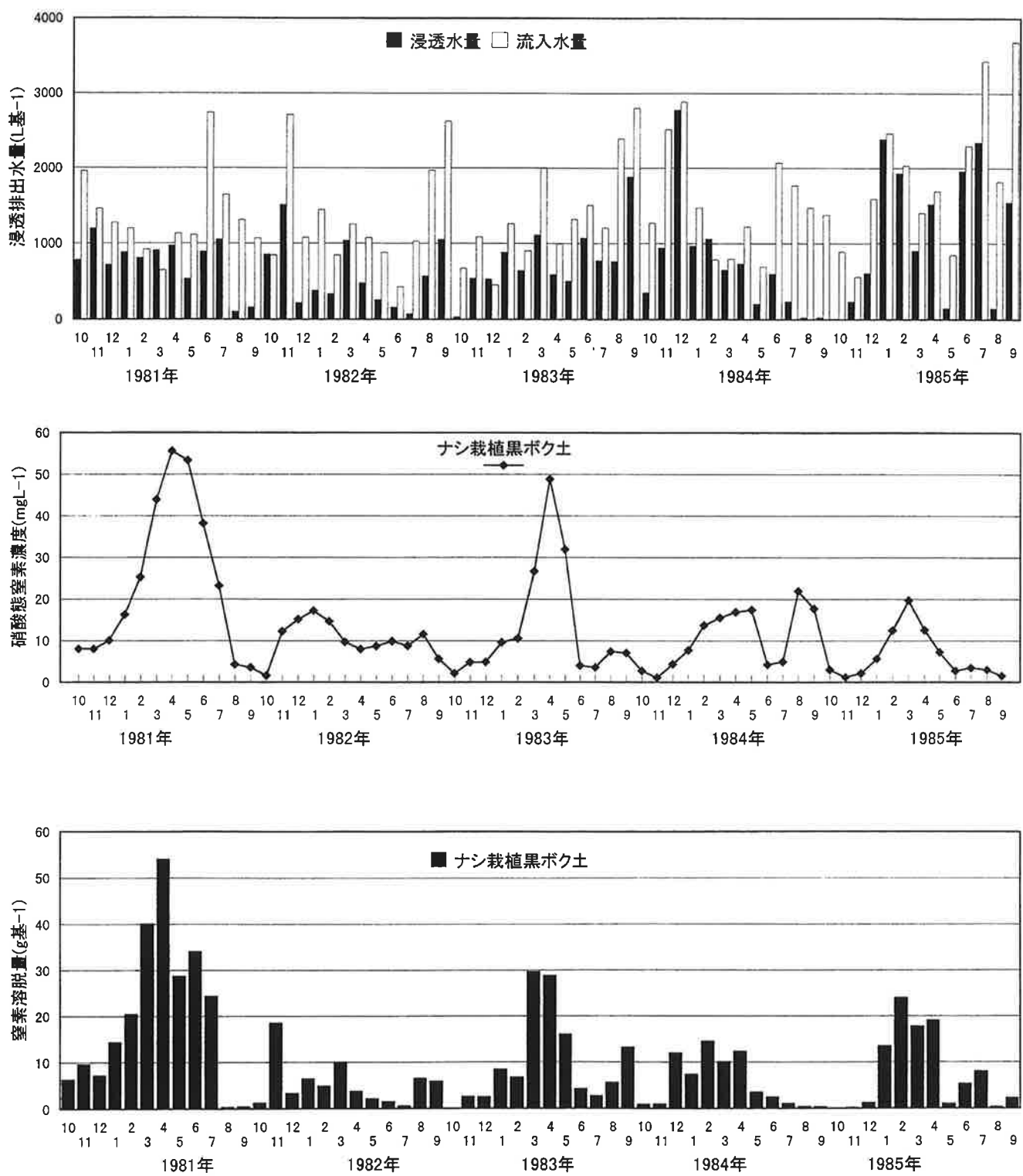
項目	1981年	1982年	1983年	1984年	1985年	合計（平均）
流入水量（L 基 ⁻¹ ）	16,466	16,180	16,594	18,333	22,721	90,294 (18,059)
浸透水量（L 基 ⁻¹ ）	9,039	6,939	9,335	8,585	13,739	47,637 (9,527)
排出割合（%）	54.9	42.9	56.3	46.8	60.5	(52.8)
年平均硝酸態窒素濃度（mgL ⁻¹ ）	26.7	9.5	13.0	7.8	6.8	(12.4)
硝酸態窒素濃度範囲（mgL ⁻¹ ）	3.6～55.7	1.6～17.5	2.2～48.9	1.1～22.0	1.2～19.8	1.1～55.7
窒素溶脱量（g基 ⁻¹ ）	241.1	65.8	121.5	67.0	93.5	588.9 (117.8)

第4-1-4表 黒ボク土ナシ栽植ライシメーターにおける果実収量および新梢伸長量の推移

項目	1981年	1982年	1983年	1984年	1985年	合計
新梢伸長量（m基 ⁻¹ ）	41.1	68.9	73.6	78.5	73.2	335.3
果実収量（kg基 ⁻¹ ）	5.2	18.1	52.8	51.9	52.0	180.0

第4-1-5表 ナシ樹の樹体乾物重と窒素吸収量

項目	離脱物(1981～1984年)				樹体(1985年)				合計
	果実	葉	枝	小計	果実	葉	枝	根	
樹体乾物重（kg基 ⁻¹ ）	16.7	7.8	13.2	37.7	6.8	3.2	13.5	10.4	71.6
窒素吸収量（g基 ⁻¹ ）	43.3	105.8	100.4	249.5	17.6	43.1	135.4	106.4	552.0



第4-1-1図 ナシ栽植黒ボク土における浸透水量, 硝酸態窒素濃度, 窒素溶脱量の時期変化

第4-1-6表 供試土壌のポリエチレンバッグ法
による窒素無機化量 (1985年)

土壌中の硝酸態窒素の増加量 (mgkg ⁻¹)						
5月	6月	7月	8月	9月	10月	合計
2.2	3.9	6.3	7.5	4.6	2.5	27.0

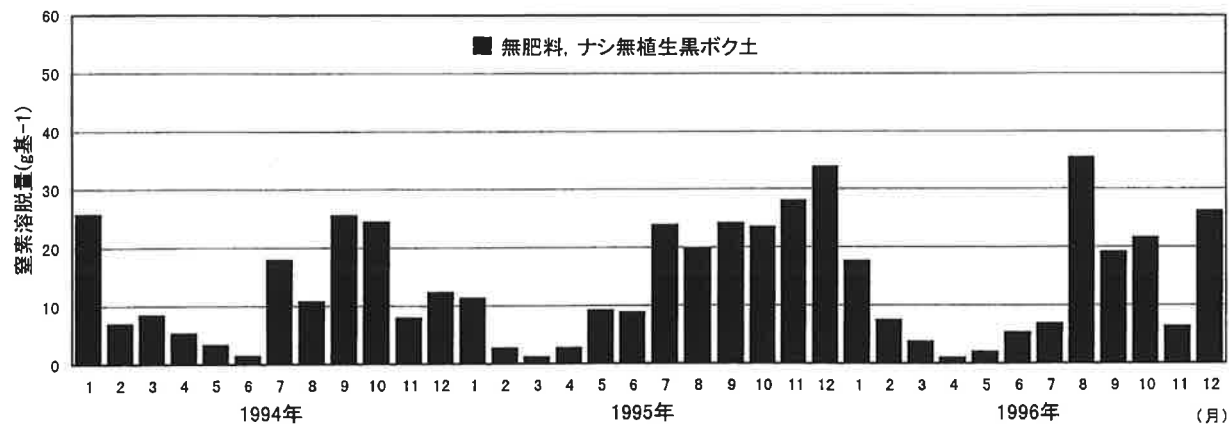
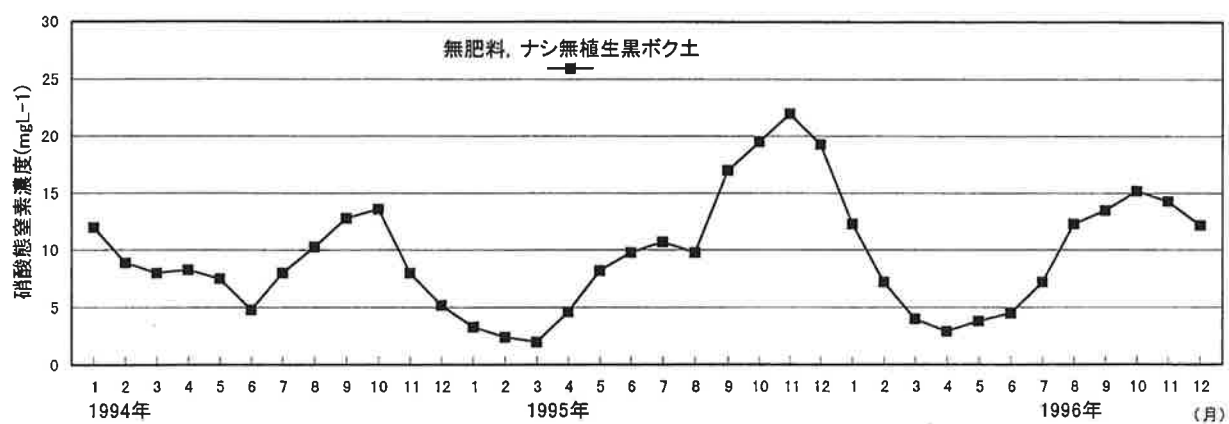
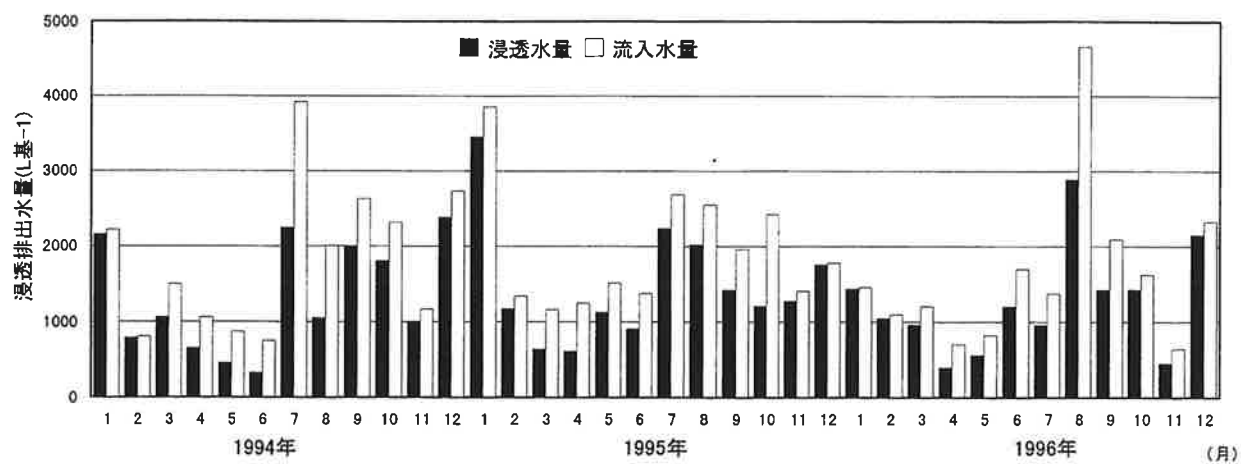
注) 0~10cmの土壌を採取

第4-1-7表 無肥料, ナシ無植生黒ボク土における浸透水量, 硝酸態窒素濃度, 窒素溶脱量

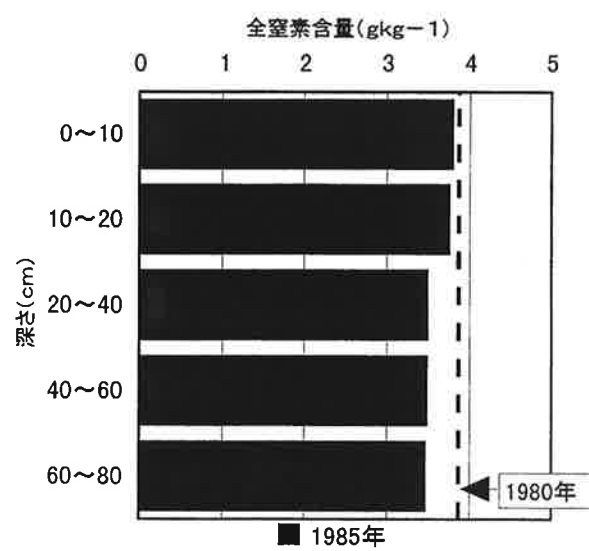
項目	1994年	1995年	1996年	合計 (平均)
流入水量 (L基 ⁻¹)	21,366	23,783	19,971	65,120 (21,707)
浸透水量 (L基 ⁻¹)	15,512	18,218	15,118	48,848
排出割合 (%)	72.6	76.6	75.7	(75.0)
年平均硝酸態窒素濃度 (mgL ⁻¹)	9.5	10.7	10.3	(10.2)
硝酸態窒素濃度範囲 (mgL ⁻¹)	4.8~13.6	2.0~22.0	2.9~15.2	2.0~22.0
窒素溶脱量 (g基 ⁻¹)	151.5	190.2	154.1	495.8 (165.3)

第4-1-8表 供試土壌における全窒素含量の変化

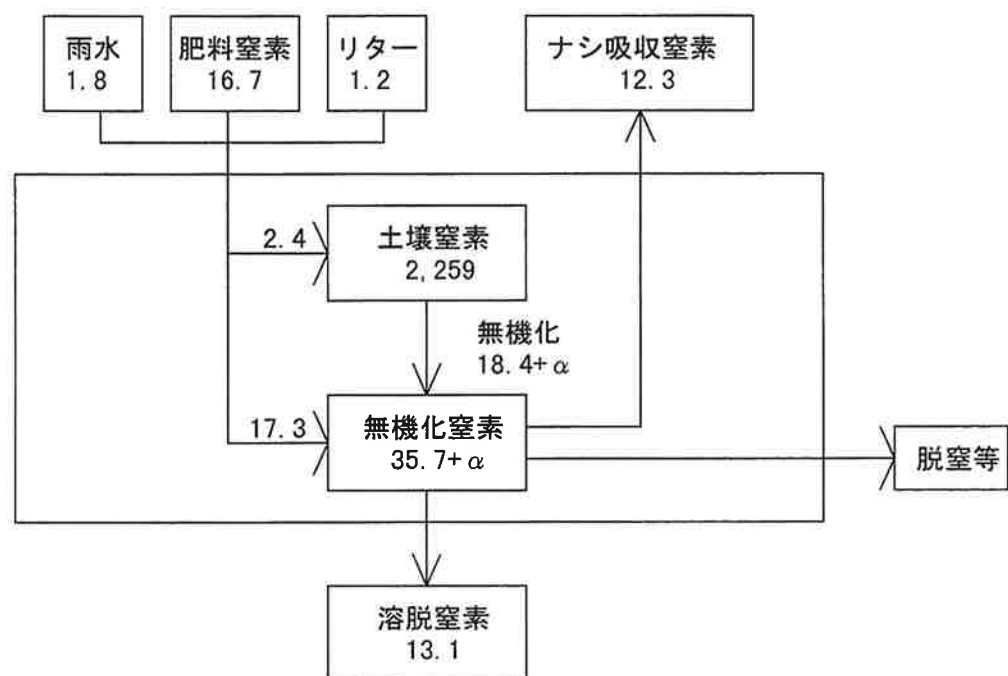
全窒素含量 (Nkg基 ⁻¹)		
処理前 (1980年)	5年後 (1985年)	増減
20.33	19.07	-1.26



第4-1-2図 無肥料, ナシ無植生黒ボク土における浸透水量, 硝酸態窒素濃度, 窒素溶脱量の時期変化



第4-1-3図 供試土壌中の全窒素含量の変化



第4-1-4図 黒ボク土ナシ栽植ライシメーターにおける窒素収支 (N gm^{-2})

第2節．施肥窒素量が窒素溶脱に及ぼす影響

1．目 的

鳥取県におけるナシの標準施肥窒素量は、 $150 \sim 250\text{kg ha}^{-1}$ であり窒素肥沃度の高い黒ボク土で少なく窒素肥沃度の低い赤黄色土で多くなっている．ナシは他の果樹と比べると比較的多肥で栽培されてきた経過がある．昭和 30 年代は有機質肥料を主体に施肥窒素量が 500kg ha^{-1} 程度が施用されていた．その後，昭和 50 年代に至って糖度向上のための減肥が推進され 200kg ha^{-1} 程度まで減少したが，近年はナシ樹の老齢化に伴って樹勢向上のために再び増加傾向にある．また，樹齢によって施肥窒素量が変化し，若齢樹の 100kg ha^{-1} 程度から老齢樹では 300kg ha^{-1} 以上に及んでいる．一方，茶樹では施肥窒素量が $1,000 \sim 1,500\text{kg ha}^{-1}$ ときわめて多く，茶園からの溶脱窒素によって近隣の湖沼や河川の硝酸態窒素濃度の上昇をきたす事例^{65,66)}も認められている．また，日本各地の地下水および湧水の硝酸態窒素の測定値⁶⁷⁾をみると，樹園地では $0.3 \sim 35.9\text{mg L}^{-1}$ と畑地より低いものの，茶園，ミカン園，ナシ園で 10mg L^{-1} を越える濃度が観測されている．鳥取県のナシ園においては，今のところ施肥窒素の溶脱による地下水の硝酸汚染への影響は明らかではない．しかし，多肥を継続すると影響の増大も危惧される状況にある．

ナシ園における地表面管理法は，放任型の雑草草生が多い．施肥窒素は草とナシ樹によって吸収されるため，草生によって窒素溶脱が変化すると考えられる．しかし，草生栽培によってどの程度の窒素溶脱防止効果があるかについて定量的に調査された事例は少ないのが現状である．

そこで，ナシ園における施肥窒素量と窒素溶脱量の関係を明らかにし，窒素溶脱が大きく増加しない施肥窒素量を求めようとした．さらに，草生導入による窒素溶脱量の変化を追跡した．

2．材料および方法

前節と同様のライシメーターに，供試土壌として第 4-2-1 表に示す東伯郡東郷町で採取した大山中部火山灰層に由来する黄褐色土壌を充填し，1989 年 12 月に 1 年生ゴールド二十世紀を 1 基に 1 樹植え付けた．翌年は同一管理で養成

した後、1990 年 9 月から第 4-2-2 表に示す処理を行った。すなわち、年間施肥窒素量として 1 基あたり 100, 200, 400, 800g の 4 水準を設け、ナシの慣行施肥に準じて処理を行った（以下、処理区は N1, N2, N3, N4 と略記する）。浸透水の採取および硝酸態窒素濃度の測定は、前述した方法と同様に行い、1992 年から 1997 年までの 6 年間の継続調査を実施した。なお、地表面管理は 1995 年 9 月までは清耕とし、10 月にペレニアルライグラスを播種して草生状態に転換した。牧草は、草丈が 20cm を越えたら 5cm 程度に刈り込んだ。刈草は重量を測定後、ナシ主幹部周囲（半径 1 m）にマルチした。

ナシ樹の主幹から 1.5m 離れた位置の深さ 20cm にポーラスカップを埋設し、吸引法によって定期的に土壤溶液の採取を行った。得られた土壤溶液は浸透水と同様に硝酸態窒素濃度を測定した。

毎年 6 月と 8 月に短果枝中位葉 20 枚を採取し、葉中窒素濃度を測定した。果実調査は 9 月上旬に行い、収量は全果実を、糖度等の果実品質は 30 個を採取して行った。樹体生育は落葉後に全枝の長さと太さを調査し、あらかじめ求めておいた乾物重への換算式を用いた推定法⁶⁸⁾によって部位別の樹体乾物増加量を得た。また、落葉およびせん定枝を枝齢別に採取して、窒素含量を測定し窒素吸収量を求めた。

3. 結 果

1) 土壤溶液中の硝酸態窒素濃度

深さ 20cm における土壤溶液中の硝酸態窒素濃度は、各区とも春期と秋期に濃度ピークが認められた（第 4-2-1 図）。1994 年 5 月の濃度は N1 で 8mgL^{-1} 、N2 で 18mgL^{-1} 、N3 で 42mgL^{-1} 、N4 で 100mgL^{-1} となり、施肥窒素量にほぼ比例して高くなった。

地表面はペレニアルライグラスを播種後、徐々に伸長して 1995 年 11 月には地表面をほぼ覆ったが冬期の生育量は少なかった。翌年、春期から夏期にかけて生育が旺盛となった。深さ 20cm の土壤溶液中の硝酸態窒素濃度は、草の生育が旺盛となった 5～6 月には、N1, N2, N3 において $1\sim 12\text{mgL}^{-1}$ となり、前年の清耕期間の $9\sim 29\text{mgL}^{-1}$ に比べて大きな低下が認められた。しかし、この時期においても N4 では、大きな減少は認められなかった。草の生育が最

も旺盛となった 7 月から 10 月は、N 4 でも変化が認められ、前年の $25 \sim 28\text{mgL}^{-1}$ に対し $4 \sim 11\text{mgL}^{-1}$ に減少した。その後、N 1, N 2, N 3 では 11 月まで $1 \sim 2\text{mgL}^{-1}$ の低濃度で経過した。

2) 浸透水の硝酸態窒素濃度と窒素溶脱量

浸透排出水量は、降水量が多かった 1993 年が $14,805\text{L 基}^{-1}$ 、1995 年が $15,480\text{L 基}^{-1}$ 、1997 年が $11,674\text{L 基}^{-1}$ と多く、流入水量に対してそれぞれ 69.7 %, 66.4 %, 50.8 % の排出割合となった。平年よりやや降水量が少なかった 1992 年、1994 年、1996 年は、浸透排出水量がそれぞれ $9,371\text{L 基}^{-1}$ 、 $10,875\text{L 基}^{-1}$ 、 $8,974\text{L 基}^{-1}$ となり、56.0 %, 49.4%, 43.7 % の排出割合となった（第 4-2-2 図、第 4-2-3 表）。

浸透水の硝酸態窒素濃度は、年間を通じて施肥窒素量が多いほど高く経過した。N4 では 1992 年 8 月、1992 年 12 月～1993 年 4 月、1994 年 1～3 月、1994 年 7 月、1995 年 3 月、1995 年 6 月、1995 年 12 月～1996 年 2 月、1997 年 1～4 月、7 月に濃度ピークが認められた。N1, N2, N3 についても濃度は低いものの、ほぼ同様な濃度変化を示した。硝酸態窒素濃度が 10mgL^{-1} を越えた期間は、N1 ではほとんどなく、N2 ではピーク時の冬期と夏期に $14.9 \sim 26.5\text{mgL}^{-1}$ と上回った。N3 では濃度が低下した春期と秋期に $4.0 \sim 15.2\text{mgL}^{-1}$ と 10mgL^{-1} 程度となり、春期と冬期には常に上回った。N4 では全期間を通して 10mgL^{-1} を大きく上回った。

清耕期間 4 年間の硝酸態窒素の平均濃度は、N1 が 5.1mgL^{-1} 、N2 が 12.6mgL^{-1} 、N3 が 22.6mgL^{-1} 、N4 が 47.2mgL^{-1} となり、施肥窒素量にほぼ比例して増加した。また、草生への転換後は徐々に濃度が減少し N 1, N 2, N 3 の 1996 年 6 月以降は 1mgL^{-1} 以下で経過した。しかし、N 4 では濃度の減少が少なく濃度ピーク時には $41 \sim 52\text{mgL}^{-1}$ となった。草生期間 2 年間の平均窒素濃度は、N 1 で 0.9mgL^{-1} 、N 2 で 1.6mgL^{-1} 、N 3 で 3.1mgL^{-1} 、N 4 で 28.2mgL^{-1} となり、清耕状態での平均濃度に比べ低下した（第 4-2-4 表）。

窒素溶脱量は、浸透水の窒素濃度が高く浸透水量の多い時期に多くなった。窒素溶脱量が最も多かった月は、1992 年 2 月、1993 年 1 月、1994 年 1 月、1995 年 1 月と 12 月となり冬期に窒素の溶脱量が多かった。また、梅雨期に降水量が多かった 1993 年 7 月、1994 年 7 月、1995 年 7 月も窒素溶脱量が多くなった。草生導入後の窒素溶脱量は、N 1, N 2, N 3 では 1996 年 4 月以降に、月間

溶脱量 $0.1 \sim 3.5\text{g 基}^{-1}$ と大きく減少し、窒素溶脱はほとんど認められなくなった。N4 は 1996 年 12 月から 1997 年 2 月と 1997 年 7 月に溶脱量が多く、大きな減少は認められなかった。

清耕期間 4 年間での年平均の窒素溶脱量は、N1 が 63.8g 基^{-1} 、N2 が 159.5g 基^{-1} 、N3 が 285.7g 基^{-1} 、N4 が 596.2g 基^{-1} となり施肥窒素量にほぼ正比例して増加した。また、草生期間の 2 年間での年平均窒素溶脱量は、N1 で 9.7g 基^{-1} 、N2 で 16.1g 基^{-1} 、N3 で 32.0g 基^{-1} 、N4 で 291.6g 基^{-1} となり、清耕条件での年平均の窒素溶脱量に比べ、N1 は 15.2 %、N2 は 10.1 %、N3 は 11.2 %、N4 は 48.9 %に減少した（第 4-2-5 表）。

3) 樹体生育と果実品質

ナシ樹の新梢伸長量は、栽植初期の活着不良によって樹体生育が他の区に比べやや劣った N2 を除いて、施肥窒素量の増加に伴って多くなった（第 4-2-3 図）。草生状態となった 1996 年の新梢伸長量は、N1、N2、N3 において前年に比べ 40 ~ 87 % となり樹体生育量の低下が認められた。さらに、1997 年は各区とも前年より伸長量が減少し、樹冠拡大期の樹齢であるにもかかわらず生育の停滞が認められた。

果実収量は樹体生育に対応して施肥窒素量が多く生育の旺盛な区ほど多くなった。草生導入後の果実収量は、各区とも花芽着生量が多くなったため、新梢の伸長量が減少したものの増加した（第 4-2-4 図）。清耕期間の果実肥大は、施肥窒素量が多いほど良好となる傾向にあり、N4 で最も果重が多くなった。また、果実の着色は逆に施肥窒素量が多いほど遅れる傾向を示した。草生導入後は、各区とも着色が早まる傾向にあった（第 4-2-6 表）。

葉中窒素含量は、展葉期の 6 月と伸長停止後の 8 月とも施肥窒素量が多いほど高くなった（第 4-2-7 表）。6 月の平均窒素含量は、N1 で 27.2gkg^{-1} 、N2 で 29.0gkg^{-1} 、N3 で 29.4gkg^{-1} 、N4 で 30.3gkg^{-1} となり、一般栽培での適正值（ $27 \sim 29\text{gkg}^{-1}$ ）と比較すると、N1 と N2 は適正範囲内にあったが、N3 はやや高い値となり、N4 では過剰値となった。また、各区の葉中窒素含量は、清耕期間平均に比べ草生期間平均が 6 月で $1.9 \sim 7.0\text{gkg}^{-1}$ 、8 月で $1.0 \sim 6.1\text{gkg}^{-1}$ の減少が認められ、その減少程度は施肥窒素量が少ないほど大きくなる傾向にあった。

清耕期間 4 年間のナシ樹の窒素吸収量は、N1 が 290.2g 基^{-1} 、N2 が 263.2g 基^{-1} 、

N3 が 415.1g 基^{-1} 、N4 が 511.7g 基^{-1} となった（第 4-2-8 表）。N1 の窒素吸収量に対する各区の増加程度は、N3 が 4 倍の施肥窒素量によって 1.4 倍、N4 が 8 倍の施肥窒素量によって 1.8 倍の増加にとどまった。草生期間 2 年間における樹体の窒素吸収量は、N1 で 163.6g 基^{-1} 、N2 で 190.9g 基^{-1} 、N3 で 313.4g 基^{-1} 、N4 で 400.3g 基^{-1} となった。また、N1 に対する増加程度は、N3 で 1.9 倍、N4 で 2.4 倍となり清耕期間に比べ差が大きくなった（第 4-2-9 表）。

草生栽培における牧草の生育は、播種 1 年目の 1996 年に比べ、再生による 2 年目の 1997 年で旺盛となった。草による窒素吸収量は、1996 年が N1 で 34g 基^{-1} 、N2 で 68g 基^{-1} 、N3 で 140g 基^{-1} 、N4 で 227g 基^{-1} となり、施肥窒素量の 28 ～ 35 % に相当する窒素が草によって吸収された。1997 年は N1 で 175g 基^{-1} 、N2 で 216g 基^{-1} 、N3 で 531g 基^{-1} 、N4 で 715g 基^{-1} となり、施肥窒素量を上回る窒素吸収量となった（第 4-2-10 表）。

3. 考 察

1) 施肥窒素量が窒素溶脱に及ぼす影響

果樹に対する施肥窒素量⁶⁹⁾は、ミカン等の常緑果樹では $250 \sim 350\text{kg ha}^{-1}$ と多く、落葉果樹ではナシで $200 \sim 300\text{kg ha}^{-1}$ 、リンゴとモモで $150 \sim 200\text{kg ha}^{-1}$ 、カキで $100 \sim 250\text{kg ha}^{-1}$ 、ブドウで $60 \sim 200\text{kg ha}^{-1}$ となっており、ナシは多肥の樹種に属する。

本試験の施肥窒素量は、N1 で 111kg ha^{-1} でありナシの若木の施用量に相当する。鳥取県におけるナシ成木の慣行施肥窒素量は、 $150 \sim 250\text{kg ha}^{-1}$ が標準となっており、N2 の 222kg ha^{-1} は通常の成木の施用量に相当する。また、N3 の 444kg ha^{-1} は老木や弱勢樹に対する施用量と位置付けられ、ナシ樹での最大施用量に相当する。N4 の 888kg ha^{-1} は、現実のナシ園の施肥レベルより遥かに多く、すでに窒素溶脱による硝酸汚染が認められる茶樹の施肥窒素量に相当する。

第 4-2-5 図に清耕期間 4 年間の結果をもとに、窒素施用量と窒素吸収量および窒素溶脱量の関係を示した。1 年間のナシの窒素吸収量は、N1 で 72.6g 基^{-1} (8.1gm^{-2}) だったのに対し、施肥窒素量が N1 の 2 倍量の N2 ではほぼ同量、N3 では 1.4 倍、N4 では 1.8 倍の増加にとどまっており、窒素の増施による窒素吸収量の増加は少ない。これに対し、窒素溶脱量は N1 で 63.8g 基^{-1} (7.1gm^{-2})

に対し、N 2 で 2.5 倍、N 3 で 4.5 倍、N 4 で 9.3 倍と施肥窒素量の増加にほぼ比例して増加している。これは、ナシ樹が施肥窒素の利用率が低いため増施しても窒素吸収が頭打ちとなり、残存した窒素のほとんどが溶脱したためと考えられる。

ここで、年平均の浸透水量を $12,634 \text{ L 基}^{-1}$ ($1,404 \text{ Lm}^{-2}$) とすると、水道水の水質基準である硝酸態窒素濃度 10 mgL^{-1} を維持するためには、窒素溶脱量は 126.3 g 基^{-1} (14.0 gm^{-2}) となり、第 4-2-5 図に示した窒素施用量との関係から 165.3 g 基^{-1} (18.4 gm^{-2}) が浸透水の硝酸態窒素濃度 10 mgL^{-1} となる窒素施用量と試算できる。同様に、 20 mgL^{-1} の硝酸態窒素濃度を維持しようとするならば、 347.5 g 基^{-1} (38.6 gm^{-2}) が窒素施用量となる。一方、果実品質と樹体生育からみた適正施肥窒素量は、N 3 以上では果実の着色の遅れや葉中窒素含量の過剰が認められることから、N 2 の 200 g 基^{-1} (22.2 gm^{-2}) の近傍が適正域と考えられる。

地下 1 m で採取した浸透水の硝酸態窒素濃度が、どのように地下水等の水系汚染に結びつくかは現在のところ不明な点が多い。水域に達するまでに他の流入水によって 2 倍程度に希釈されるとすれば、現在の慣行施肥窒素量でも、水質基準を大きく上回る心配はないと言える。しがしながら、施肥窒素の多くは地下浸透しており、長期的な環境保全を図るには、ナシ園においても窒素溶脱の軽減対策が必要であろう。

窒素溶脱量の季節変化をみると、いずれの年も 1 ～ 2 月の冬期に溶脱が多くなる傾向が認められている。これは前節での結果と一致する傾向であり、晩秋から初冬に施用された窒素は、秋期の長雨や冬期の降雪によって溶脱しやすく、窒素溶脱量の増加を助長していると考えられる。従って、窒素溶脱量を軽減するには、秋から冬期の施肥量および施肥法の改善が有効と判断される。また、ナシ園の窒素溶脱量は窒素施用量に依存するので、不必要な施肥をなくすことも重要と思われる。このためには、野菜等で実用化されている樹体栄養条件の診断に基づいた施肥を導入し、必要な時期に必要なだけ養分供給を行うことが重要と考えられる。

2) 草生導入による窒素溶脱量の変化

果樹園における地表面管理法は、中耕や除草剤によって地表面を裸地に維持する清耕法、牧草や雑草を生やす草生法、稲わらや山野草、堆肥等の有機物で

地表面を覆うマルチ法がある。草生法⁷⁰⁾は、1970年代にリンゴ園において本格的な牧草草生が導入され、その後モモ園、ナシ園等にも広がった。草生法の利点^{71) ~ 75)}は養分の溶脱防止、土壌浸食の防止、有機物補給による地力向上、地表面の固結防止、土壌微生物相の好適化等が期待できるとされる。一方、欠点としては、草との養分競合、夏期の水分蒸散増加、生息場所の提供による病害虫の増加等が指摘されている。また、草生管理のための作業時間も多くなることから、草生栽培は広く普及しなかった。ところが近年になって、有機物確保が困難となったことや窒素溶脱による水系への汚染が表面化するに至って、草生栽培の溶脱防止機能が見直されている。

本試験においては、清耕から草生への転換に伴う窒素溶脱の変化を追跡した。それによると、清耕期間の窒素溶脱量は、施肥窒素量の増加に伴って施用量の63.8 ~ 74.5 %に相当する量が溶脱したのに対し、草生期間では施肥窒素量として100 ~ 400g 基⁻¹ (11.1 ~ 44.4gm⁻²) では施肥窒素量に対して8.0 ~ 9.7 %に止まり、800g 基⁻¹ (88.8gm⁻²) でも36.5 %に減少した。ナシ樹の窒素吸収量は清耕期間よりやや増加したが、新梢の伸長量の前年比は61 ~ 107 %であり、樹齢の進行や葉中窒素含量の低下からみて、草生によって窒素吸収が抑制されたと判断される。一方、草の窒素吸収量は施肥窒素量の増加に比例して増加している。これは、草の根系がナシ樹より表層に分布するため、施肥窒素の影響を強く受けたためと考えられる。しかも、夏期に窒素吸収量が低下するナシ樹の窒素吸収パターンと異なり、刈り取りによって生育が活発化することを繰り返したことも窒素吸収量の増加に影響したと判断される。オーチャードグラス草地における草の施肥窒素吸収率⁷⁶⁾は、79 ~ 90 %ときわめて高く、ナシ樹より草による吸収が先行すると考えられる。

草生による窒素溶脱量は、施肥窒素量400g 基⁻¹ (44.4gm⁻²) までは大きな増加は認められず、800g 基⁻¹ (88.8gm⁻²) に至って大きく増加し、年平均の硝酸態窒素濃度が28.2mgL⁻¹と10mgL⁻¹を越えた。清耕期間では400g 基⁻¹ (44.4gm⁻²) で22.6mgL⁻¹となったことから、ナシ園における草生栽培は、清耕栽培に比べ2倍程度の施肥窒素量で同等の窒素溶脱量となると推察できる。

清耕期間と草生期間における窒素溶脱量と窒素吸収量を第4-2-6図にまとめた。これによると施肥窒素量200g 基⁻¹の場合、ナシと草の窒素吸収量の合計は

237.5g 基⁻¹であり、ナシの吸収量だけの清耕期間より 174.2g 基⁻¹増加している。窒素溶脱量は清耕期間の 159.5g 基⁻¹に対し、草生期間では 16.1g 基⁻¹となり 143.4g 基⁻¹の減少が認められ、窒素吸収量増加分の 82 %にあたる減少割合となった。他の施肥量においても、草生に伴う窒素吸収量増加分の 51 ~ 66 %に相当する窒素が溶脱減少分となっていた。本試験においては、清耕期間と草生期間では樹齢や調査年次が異なるため同一比較できないが、草生導入による窒素溶脱の減少は、草の窒素吸収増加分にほぼ比例して現れると判断できる。

草生栽培をした一般ナシ園における草の乾物重は、400gm² 程度⁷⁴⁾とされている。これは、1996 年時では施肥窒素量 400g 基⁻¹ (44.4gm²)、1997 年時では施肥窒素量 100g 基⁻¹ (11.1gm²) での草量に相当する。本試験での草の生育状況は、1 年目が一般ほ場よりやや生育量が少なく、2 年目はマルチによって還元された窒素も加わって、かなり旺盛な生育状況となったが、2 年間の平均値ではほぼ標準施肥量の 200g 基⁻¹ (22.2gm²) が一般ナシ園の草生状態に対応している。いずれにせよ、草生導入によって窒素溶脱量が減少することは明らかであり、その程度は施肥窒素量と草量によって変動すると考えられる。

リンゴ園では牧草草生によって窒素溶脱量が 7.8gm² となり、清耕の 23.2gm² に比べ 12.8 %に減少するとしている⁵⁶⁾。本試験の草生導入による減少量も、施肥窒素量 400g 基⁻¹ (44.4gm²) までは同程度の減少割合を示し、ナシ園における通常の施肥窒素レベルでは草生による窒素溶脱軽減効果が高いことが確認された。

また、草生ミカン園や草生リンゴ園において草との養分競合を調べた結果^{62,77,78)}によると、草による施肥窒素の吸収量は春期施用窒素が多く、施肥窒素の 28 ~ 86 %としており、春先の養分競合が大きいとしている。さらに、草に吸収された施肥窒素は、刈り取り後にマルチ施用され再びナシ樹と草に吸収される循環をたどり、年間の窒素吸収量はわずか 1 %にすぎなかったとする報告⁷⁹⁾もある。草生栽培の欠点として指摘されているナシ樹との養分競合は、この試験においても認められ、葉中窒素含量、樹体伸長量の低下、果実の早熟化等、窒素吸収量不足の兆候が現れた。草生栽培を長期間継続すると、草による吸収窒素の土壌還元によって土壌の窒素肥沃度が向上し、5 年目以降は徐々に窒素吸収量が増加すること⁸⁰⁾、刈り取った草を還元施用することで、施肥窒素の 20

%に相当する窒素吸収が見込まれること⁸¹⁾が知られている。本試験は2年間という短期間の結果であり、長期的の動向は判断できないが、少なくとも草による窒素吸収量に対応する量が、窒素溶脱量の減少に結びつくものと考えられることから、窒素溶脱の軽減には草生の効果が大きく、草量が多くなる牧草草生がより効果的と判断される。

なお、草生状態における脱窒量については、ライグラスで $0.2 \sim 2.9\text{gm}^2$ とする報告^{82,83)}もあるが、詳細は不明の点が多い。今後は、草生による窒素収支をさらに解明するとともに、養分競合をできるだけ少なくできる草管理法の検討が必要であろう。

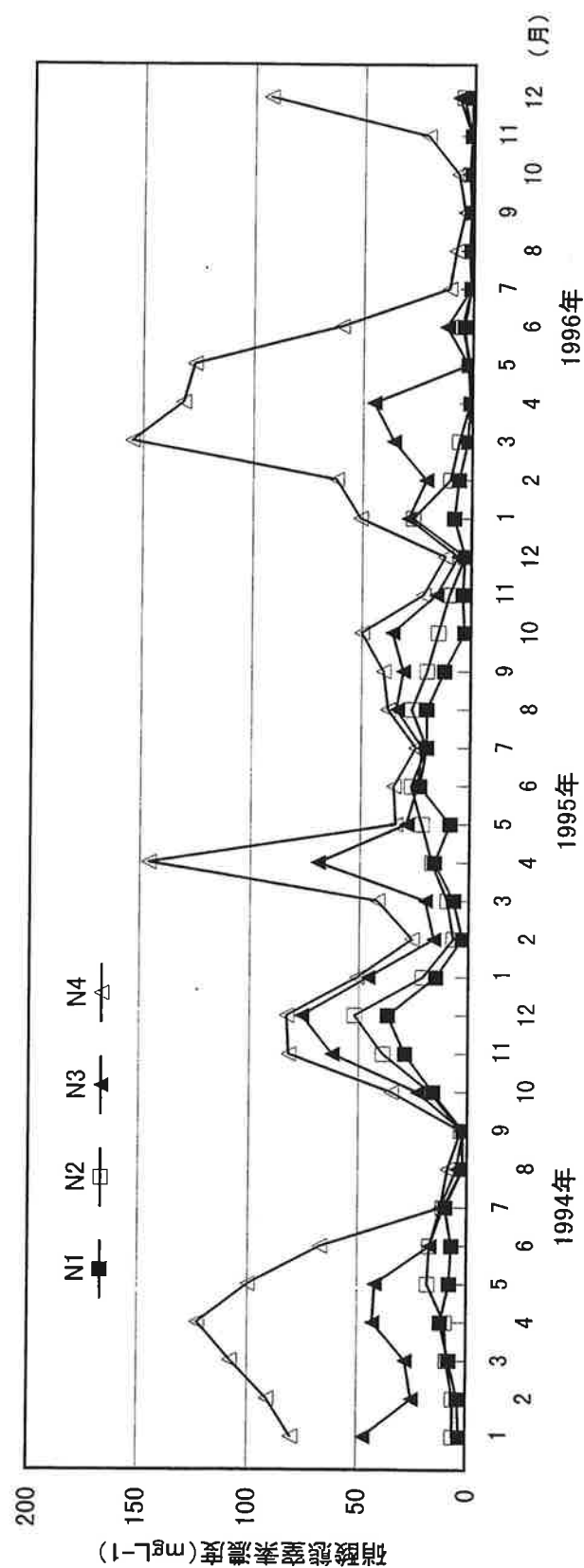
第4-2-1表 供試土壌の理化学性

土色	土性	pH (H ₂ O)	全窒素 (g kg ⁻¹)	CEC (cmol (+) kg ⁻¹)	交換性塩基含量 (cg kg ⁻¹)			Truog P ₂ O ₅ (cg kg ⁻¹)
					CaO	MgO	K ₂ O	
7.5YR4/4	LiC	5.2	1.11	26.4	92	19	41	1.2

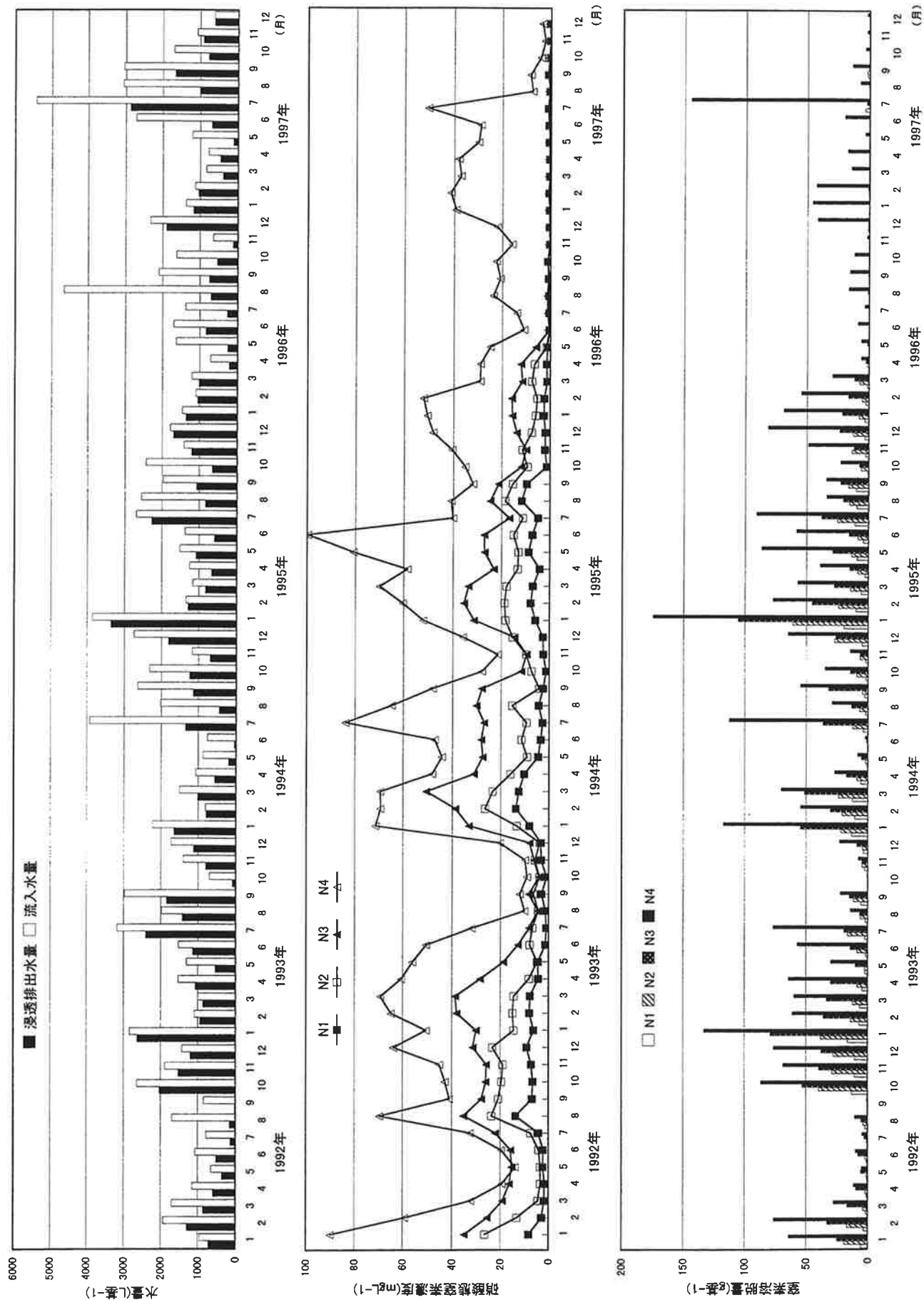
第4-2-2表 供試区における窒素施用法 (1992～1997年)

処理区分	窒素施用量 (g 基 ⁻¹)				施用成分量 (kg ha ⁻¹)			
	3月上旬	6月上旬	9月下旬	12月上旬	計	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
N 1	10	10	30	50	100	111	82	82
N 2	20	20	60	100	200	222	164	164
N 3	40	40	120	200	400	444	329	329
N 4	80	80	240	400	800	888	657	657

注) 3月上旬はリン硝安カリS604(16-10-14), 6月上旬と12月上旬は有機入り化成(8-5-6)
9月下旬はリン加安S550(15-15-10)を使用した.



第4-2-1図 深さ20cmにおける土壌溶液中の硝酸態窒素濃度の変化



第4-2-2図 施肥窒素量の違いによる浸透排出水量、硝酸態窒素濃度、窒素溶脱量の時期変化

第4-2-3表 ナシ栽植ライシメーターにおける浸透水の排出量と排出割合

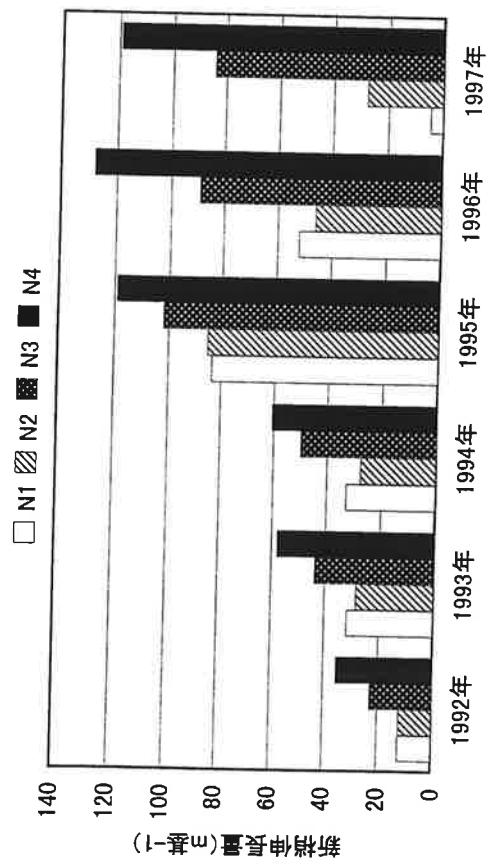
項目	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	合計	年平均
降水量 (L基 ⁻¹)	15,204	20,693	15,521	18,218	15,118	18,489	103,246	17,208
かん水量 (L基 ⁻¹)	1,530	540	6,480	5,102	5,410	4,471	23,533	3,922
排水量 (L基 ⁻¹)	9,371	14,805	10,878	15,480	8,974	11,674	71,182	11,864
排出割合 (%)	56.0	69.7	49.4	66.4	43.7	50.8	56.1	56.1

第4-2-4表 浸透水の硝酸態窒素の年平均濃度 (mgL⁻¹)

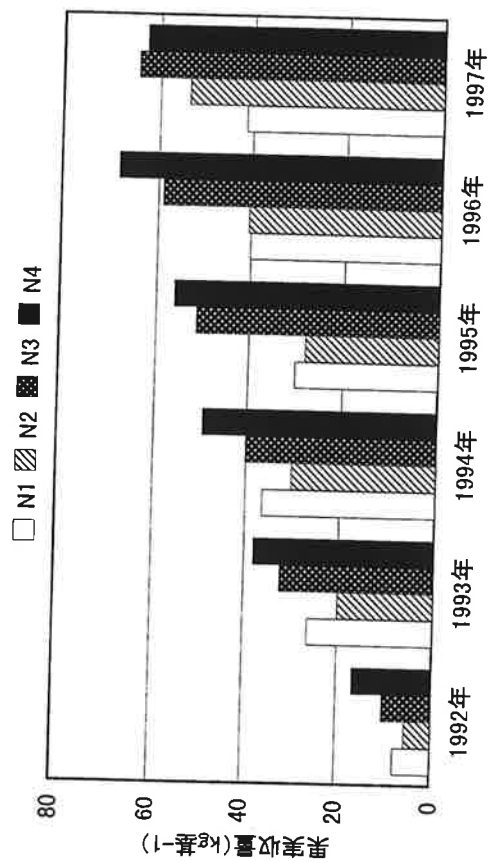
処理区分	1992年		1993年		1994年		1995年		1996年		1997年	
	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)
N 1	5.5 (1.7~13.6)	3.7 (0.9~7.9)	5.5 (1.4~13.7)	5.7 (1.4~11.6)	1.3 (0.4~2.6)	0.7 (0.1~1.2)						
N 2	15.6 (3.4~26.5)	8.6 (3.7~14.9)	13.3 (4.1~26.5)	14.2 (7.5~18.7)	2.9 (0.3~7.5)	0.6 (0.3~1.2)						
N 3	25.2 (15.2~35.2)	17.3 (4.0~38.6)	26.5 (9.3~50.5)	23.4 (9.8~35.4)	6.4 (0.3~15.8)	0.6 (0.2~1.0)						
N 4	47.2 (13.8~90.0)	37.1 (8.9~69.2)	54.2 (21.3~84.0)	52.0 (31.9~99.7)	29.6 (10.9~52.1)	27.2 (2.4~50.4)						

第4-2-5表 ナシ栽植ライシメーターにおける窒素溶脱量

処理区分	窒素溶脱量 (N g基 ⁻¹)						年平均窒素溶脱量 (N g基 ⁻¹)	
	1992年			1993年			清耕期間 (1992~1995年)	
	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	草生期間 (1996~1997年)	
N 1	51.6	55.0	59.8	88.8	11.4	8.0	63.8	9.7
N 2	146.3	127.3	144.3	220.2	25.6	6.7	159.5	16.1
N 3	236.2	256.8	287.8	362.1	57.3	6.7	285.7	32.0
N 4	442.5	548.7	589.2	804.3	265.7	317.5	596.2	291.6



第4-2-3図 供試区におけるナシの新梢伸長量の推移



第4-2-4図 供試区におけるナシの果実収量の推移

第4-2-6表 供試樹の果実品質

処理区分	調査日		果実収量 (kg基 ⁻¹)	収穫果数 (個基 ⁻¹)	平均果重 (g)	果色 (カラチャート値)	糖度 (brix%)	果肉硬度 (kgcm ⁻²)
	(年. 月. 日)							
N 1	1994. 9. 5		36. 4	138	264	3. 0	11. 0	0. 94
	1995. 9. 13		30. 1	115	262	3. 1	11. 5	0. 82
	1996. 9. 17		40. 2	130	309	3. 7	11. 5	0. 74
N 2	1997. 9. 9		41. 4	155	267	3. 2	11. 6	0. 83
	1994. 9. 5		30. 2	134	225	3. 0	11. 0	0. 90
	1995. 9. 13		27. 9	127	220	3. 0	11. 4	0. 77
N 3	1996. 9. 17		40. 5	140	289	3. 3	11. 3	0. 81
	1997. 9. 9		53. 5	208	257	3. 3	11. 7	0. 80
N 4	1994. 9. 5		40. 2	142	283	2. 6	11. 0	1. 05
	1995. 9. 13		51. 2	176	291	2. 8	11. 8	0. 86
	1996. 9. 17		58. 9	180	327	3. 0	11. 3	0. 87
N 4	1997. 9. 9		64. 7	195	332	2. 7	11. 4	0. 89
	1994. 9. 5		49. 4	163	303	2. 3	11. 4	1. 05
	1995. 9. 13		56. 0	188	298	2. 6	11. 9	0. 87
	1996. 9. 17		68. 4	218	314	2. 9	11. 2	0. 86
	1997. 9. 9		63. 0	195	323	2. 7	11. 3	0. 90

第4-2-7表 処理期間におけるナシ樹の葉中窒素含量 (gkg⁻¹)

処理区分	1992年		1993年		1994年		1995年		1996年		1997年		清耕期間平均		草生期間平均	
	6月	8月	6月	8月	6月	8月	6月	8月	6月	8月	6月	8月	6月	8月	6月	8月
N 1	26. 0	27. 2	27. 5	25. 2	27. 1	25. 8	28. 0	23. 6	22. 9	19. 7	17. 6	19. 0	27. 2	25. 5	20. 3	19. 4
N 2	30. 2	27. 1	29. 2	25. 8	27. 3	26. 0	29. 4	25. 0	23. 5	21. 6	22. 5	21. 0	29. 0	26. 0	23. 0	21. 3
N 3	30. 1	27. 6	29. 4	26. 0	29. 2	26. 3	28. 7	25. 2	26. 7	25. 9	25. 7	22. 9	29. 4	26. 3	26. 2	24. 4
N 4	31. 3	28. 8	30. 7	26. 4	29. 5	26. 8	29. 6	26. 1	28. 4	26. 4	28. 4	25. 7	30. 3	27. 0	28. 4	26. 1

第4-2-8表 清耕期間におけるナシ樹の樹体乾物重と窒素吸収量(1992～1995年)

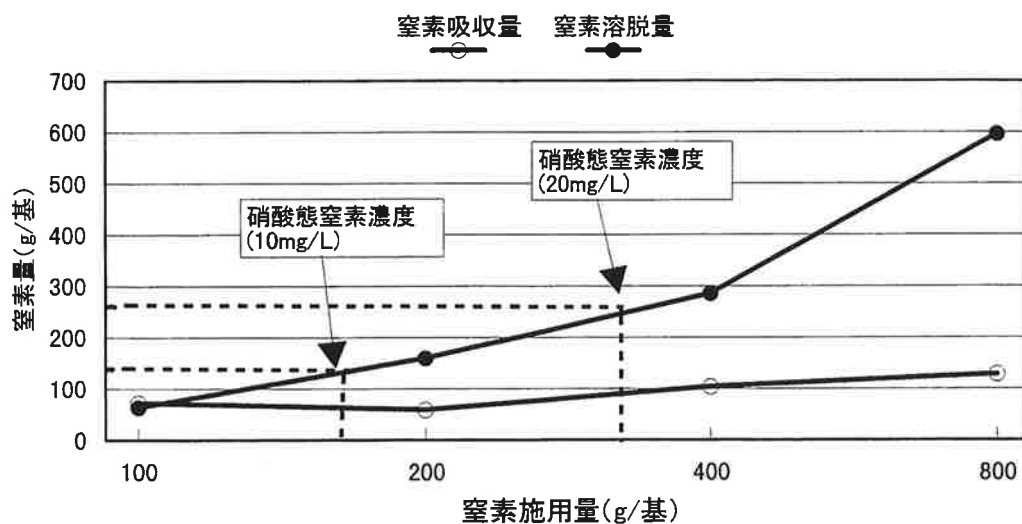
処理区分	項目	離脱物(1992～1995)				樹体増加量(1992～1995)			合計
		果実	落葉	せん定枝	小計	枝幹	根	小計	
N 1	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	15.1	6.9	4.3	26.3	12.1	5.4	17.6	43.8
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	34.7	103.7	29.2	167.6	84.6	38.1	122.6	290.2
N 2	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	11.3	5.7	2.4	19.4	11.0	5.0	16.0	35.4
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	26.0	96.9	26.7	139.6	78.4	35.3	113.6	263.2
N 3	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	20.1	8.8	4.8	33.7	16.1	7.3	23.3	57.0
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	46.3	166.4	34.4	247.1	115.9	52.2	168.1	415.1
N 4	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	24.0	10.5	7.4	41.9	17.3	7.8	25.1	66.9
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	55.2	219.2	53.7	328.1	126.6	57.0	183.6	511.7

第4-2-9表 草生期間におけるナシ樹の樹体乾物重と窒素吸収量(1996～1997年)

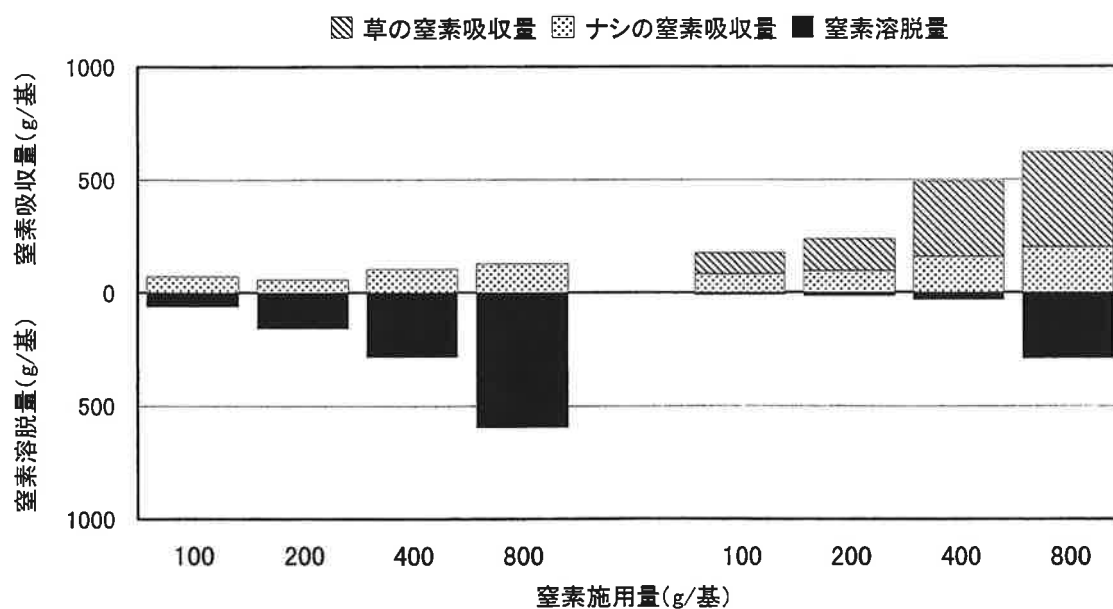
処理区分	項目	離脱物(1996～1997)				樹体増加量(1996～1997)			合計
		果実	落葉	せん定枝	小計	枝幹	根	小計	
N 1	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	12.2	6.0	2.7	20.9	3.6	1.0	4.6	25.5
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	28.3	86.1	18.2	132.6	21.4	9.6	31.0	163.6
N 2	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	14.1	6.5	2.3	22.9	4.5	1.2	5.7	28.6
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	32.7	104.0	15.3	152.0	26.5	12.4	38.9	190.9
N 3	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	18.5	9.2	4.6	32.3	6.8	1.8	8.6	40.9
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	42.8	177.3	31.0	251.1	43.4	20.0	63.4	314.5
N 4	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	19.8	10.6	6.9	37.3	8.4	2.4	10.8	48.1
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	45.5	222.8	46.8	315.1	57.5	27.7	85.2	400.3

第4-2-10表 草による窒素吸収量 (g 基⁻¹)

処理区分	1996年			1997年			合計	年平均
	刈草		計	刈草		計		
	茎根	計		茎根	計			
N 1	8	6	14	127	48	175	189	95
N 2	56	12	68	179	37	216	284	142
N 3	125	15	140	412	107	519	659	330
N 4	210	17	227	629	86	715	942	471



第4-2-5図 施肥窒素量の増加に伴う窒素吸収量と窒素溶脱量の関係



第4-2-6図 牧草草生への転換による窒素溶脱量および窒素吸収量の変化

第5章 被覆肥料の施用効果と窒素溶脱への影響

1. 目 的

現在、肥効調節型肥料として様々な溶出特性を持った被覆肥料が市販されており、水稻では全量一回施用による施肥技術^{84,85)}が実用化されている。また、畑作物^{86 ~ 88)}に対しても利用が検討されているが、まだ実用例は少ないのが現状である。被覆肥料は肥効の持続性に優れており^{89,90)}、施肥の省力化と窒素溶脱の軽減が可能^{91,92)}とされているが、その利用にあたっては収量や品質のみならず、対象作物毎に窒素吸収特性との適合性と窒素溶脱への影響を考慮して適切な施用法を明らかにすることが重要である。

シバは、4月から10月までの6か月間に10回以上の施肥を行うのが慣行となっている。生育最盛期には月に2～3回の刈り込みを実施し、分岐を促すことで密なシバを形成させている。そのためには窒素肥効を切らさないことが重要であり、分施回数が多くなっている。長期間の肥効が得られる被覆肥料は、シバ生産においても有効な活用が期待できるが、その施用効果については明らかではない。また、ナガイモ栽培は、4月に元肥を施用して5月に種芋を植え付け、10月に収穫を行う体系となっている。その間に10回以上の追肥を行うのが慣行栽培となっており、年間の窒素施用量は40～50g m^{-2} にも及んでいる。ナガイモに対する被覆肥料の利用については、いくつかの報告^{36,93)}はあるものの、窒素溶脱が激しいとされる砂丘ナガイモ畑において、被覆肥料による窒素溶脱の影響を詳細に検討した例は少ない。

ナシに対する窒素施肥は、収穫後の秋肥、落葉後の冬肥、萌芽前から展葉初期の春肥、果実肥大期の夏肥に大別でき、年5～7回に分施するのが慣行となっている。窒素供給が長期間にわたるナシに対しては、被覆肥料が有効であると考えられるが、好適な窒素供給を行うためには春と秋に2つの肥効ピークが必要であり、被覆肥料の利用を難しくしている。果樹での被覆肥料の利用は、果実品質を中心にいくつかの樹種^{94 ~ 96)}で検討されているが、窒素溶脱を含めた施用効果について調査した事例はほとんどない。

シバ、ナガイモ、ナシは栽培期間が長く、施肥回数も多いため被覆肥料を用いることで大幅な省力化や効率的な養分供給による減肥と窒素溶脱の減少が期

待できる．そこで，これらの作物に対して窒素溶脱の視点から，被覆肥料の肥効と窒素溶脱への影響について検討した．

2．材料および方法

シバ，ナガイモ，ナシに対して各作物毎に窒素溶脱の軽減に有効と思われる被覆肥料を供試し，ライシメーター試験によって慣行施肥との窒素溶脱量を比較した．

1) シバのライシメーター試験

シバは第2章と同様のライシメーターを用い，1995年と1996年の2年間の調査とした．1995年は被覆肥料区として被覆尿素 LP70 と LPS100 を重量比で 6:4 に混合し，Nとして 26gm^{-2} を4月に全量1回施用した．慣行施肥区は1回の窒素施用量を 3g として4月から9月まで11回に分施した．また，被覆肥料区と同じ窒素施用量で被覆肥料からの窒素溶出に近似するように4～5月と9月に施用量を減じた減肥区を設けた．1996年は被覆肥料区の被覆尿素 LP70 と LPS100 の窒素施用量を 18gm^{-2} とし， 8gm^{-2} を5～9月に4回に分けて施用した（第5-1表）．各区2基のライシメーターを供試したが，被覆肥料区と慣行施肥区の1基は， ^{15}N をそれぞれ 3.23atom%，3.65atom%含む肥料を用いた．なお，試料採取および分析法は第2章と同様とした．

2) ナガイモのライシメーター試験

ナガイモは1区2基のライシメーター（第3章と同様）を用い，1994年と1996年の2年間の調査とした．1994年は被覆肥料として被覆燐硝安カリ（ロング140）を5月にNとして 36gm^{-2} 施用するロング区と被覆尿素（LP50 と LP140 を重量比で等量に混合）を4月にNとして 40gm^{-2} を施用する LP 区を設けた．慣行施肥区は1回の窒素施用量を $1.3 \sim 3.1\text{gm}^{-2}$ として6月から9月まで11回に分施した（第5-2表）．1996年は被覆燐硝安カリ（ロング180）を用い，4月にNとして 32gm^{-2} を施用する区を被覆肥料区とした．また，被覆肥料区と同じ窒素施用量で被覆肥料からの窒素溶出に近似するように4～9月に慣行施肥と同様に 32gm^{-2} を分施する区を減肥区とした．なお，慣行施肥区の施肥窒素量は 40gm^{-2} とした．

3) ナシのライシメーター試験

ナシは第4章第1節で用いたライシメーターにおいて、4年生ゴールド二十世紀を供試して、1991年9月から処理を行った（1区2基）。被覆肥料区は、9月下旬に被覆尿素 LPS100 と高度化成を 3:1（Nとして LPS100 を 112.5g と化成 37.5g）に混合して施用した（第5-3表）。慣行施肥区は、Nとして 150g を年4回の分施とし、9月下旬に 30%、12月上旬に 50%、3月上旬に 10%、6月上旬に 10%を施用した。なお、地表面は常に清耕状態とした。

さらに、同型のライシメーター内において、各作物に供試した被覆肥料 5g をポリプロピレン製メッシュバッグ（市販のお茶用バッグ）に入れ、深さ 10cm の土中に埋設した。1か月毎に肥料を掘り出して残存する窒素量を測定し、期間毎の窒素溶出量を求めた。

3. 結 果

1) シバに対する被覆肥料の施用効果

(1) 供試被覆肥料からの窒素溶出

被覆肥料区における 1995 年の窒素溶出量は、6月まで $1.8 \sim 2.4\text{gm}^{-2}$ で経過し LP70 からの溶出割合が多かった。7月になると 8.6gm^{-2} に溶出量が増加し、LP70 の溶出が最大となった。8月は 9.3gm^{-2} と最も多い期間溶出量を示し、LPS100 の溶出が最大となった。9月には 2.2gm^{-2} に減少し、10月には 0.5gm^{-2} まで少なくなった（第5-1図）。

1996 年の被覆肥料区は、化成肥料を加えたため、6月までと9月以降の窒素溶出量が 1995 年より多くなった。7～8月は被覆肥料の施用量を少なくしたため、1995 年に比べて窒素溶出量が $2 \sim 3\text{gm}^{-2}$ 少なくなった。

(2) 窒素溶脱量

ライシメーターからの浸透排出水量は、7月に多雨だった 1995 年が $1,541\text{Lm}^{-2}$ 、比較的小雨だった 1996 年が $1,215\text{Lm}^{-2}$ となり、それぞれ流入水量に対して 56 %、65 % の排出割合となった（第5-2図）。

浸透水の硝酸態窒素濃度は、慣行施肥区において 1995 年 7～8月、1996 年 9～10月に $15 \sim 16\text{mgL}^{-1}$ と最大となった。被覆肥料区は 1995 年 10月に 14mgL^{-1} と最大となり慣行施肥区より高くなったが、他の期間は常に慣行施肥区より低かった。減肥区は 1995 年 6～7月に被覆肥料区より高くなったが、8～11月

は低く経過した。年平均濃度は 1995 年が慣行施肥区の 9.3mgL^{-1} に対し、被覆肥料区は 6.7mgL^{-1} と低く、同じ施肥窒素量とした減肥区の 7.0mgL^{-1} とほぼ同濃度となった。また、1996 年は慣行施肥区の 7.5mgL^{-1} に対し、被覆肥料区では 3.1mgL^{-1} となり濃度の低下が認められた（第 5-4 表）。

窒素溶脱量は、浸透水の窒素濃度が高く浸透水量が多かった 1995 年 7 月、1996 年 9 月に多くなった。1995 年の窒素溶脱量は、慣行施肥区が 14.4gm^{-2} だったのに対し、被覆肥料区は 10.4gm^{-2} 、減肥区は 10.7gm^{-2} と少なかった。1996 年の窒素溶脱量も被覆肥料区が慣行施肥区より 4.2gm^{-2} の減少が認められた。施肥窒素量に対する排出割合は、慣行施肥区が 33.6 %、被覆肥料区が 26.9 %となり、被覆肥料の溶脱割合が低かった。また、減肥区では被覆肥料区とほぼ同じ窒素溶脱量と溶脱割合を示した。

（3）窒素吸収量

1995 年のシバの茎葉根乾物重は、6 月までの生育初期において慣行施肥区、被覆肥料区、減肥区の順に多かったが、7～8 月の生育最盛期は被覆肥料区が最も多く、慣行施肥区、減肥区の順となった。11 月までの生育後期は慣行施肥区が多くなり、被覆肥料区は最も少なくなった。乾物重の合計でみると、慣行施肥区、被覆肥料区、減肥区の順に多かった（第 5-5 表）。1996 年は全期間を通して慣行施肥区の乾物重が多かった。被覆肥料区では、7～8 月の乾物重は慣行施肥区に近かったが、生育初期と後期は生育が劣った。

1995 年のシバの窒素吸収量は、慣行施肥区が 26.2gm^{-2} 、減肥区が 21.8gm^{-2} 、被覆肥料区が 20.8gm^{-2} となった。被覆肥料区は 7～8 月の窒素吸収量が多かったが、生育後期の 9～11 月に少なかった。1996 年は慣行施肥区が 31.7gm^{-2} 、被覆肥料区が 25.4gm^{-2} となり、被覆肥料区は慣行施肥に対して 80 %の窒素吸収量となった。

（4）施肥窒素の分配

¹⁵N トレーサー法により求めた 1995 年の吸収窒素の施肥窒素寄与率は、慣行施肥区が 4～6 月に 46.7 %、7～8 月に 51.4 %、9～11 月に 77.2 %となり生育が進むほど多くなった。これに対し、被覆肥料区では 4～6 月に 41.1 %とやや少なかったが、7～8 月には 57.7 %と慣行施肥区より高くなった。そして、9～11 月には 2.3 %と急減した（第 5-6 表）。

1996 年の施肥窒素寄与率は、生育期間を通して慣行施肥区が被覆肥料区より高かった。生育後期における被覆肥料区の窒素吸収量は、1995 年より多くなったが、慣行施肥区の 44 % ほどだった。1 年間の施肥窒素寄与率は、1995 年の慣行施肥区で 55.4 %、被覆肥料区で 47.1 % となり、それぞれ 14.6gm^{-2} 、 9.8gm^{-2} が施肥窒素の吸収量と見込まれた。また、1996 年は慣行施肥区 19.3gm^{-2} に対し、慣行施肥区では 13.0gm^{-2} となった。

浸透水に含まれる窒素の施肥窒素寄与率は、1995 年の慣行施肥区において 7 ～ 8 月に急増して 46 % となり、11 ～ 12 月に 51 % と最大となった。その後は徐々に減少して翌年の生育開始時には 9 %、翌々年の生育開始時には 2 % にまで減少した。被覆肥料区は、7 ～ 8 月に 28 % に増加し、11 ～ 12 月に 46 % と最大となった。1 ～ 3 月には 28 % と慣行施肥の 23 % より高くなり、慣行施肥区よりピークが約 1 か月ほど遅れる傾向にあった。1996 年においては、両区とも 6 月に寄与率の増加が認められ、慣行施肥区では 10 ～ 11 月の 48 %、被覆肥料区では 8 ～ 9 月の 32 % をピークに減少した（第 5-3 図）。

収穫後に土壤中に残存した施肥窒素は、1995 年の慣行施肥区が 9.4gm^{-2} 、被覆肥料区が 7.5gm^{-2} となった。また、1996 年ではそれぞれ 10.8gm^{-2} 、 7.3gm^{-2} となった（第 5-7 表）。

2) ナガイモに対する被覆肥料の施用効果

(1) 供試被覆肥料からの窒素溶出

1994 年における被覆肥料からの窒素溶出は、7 月に 8.6gm^{-2} のピークを示し、徐々に減少した。ロング区では、収穫期の 10 月においても 3.6gm^{-2} の溶出が認められ、遅くまで続いた。LP 区 (LP50 + LP140) は、生育初期の 5 ～ 6 月に 9.7gm^{-2} と多くの溶出があり、7 月以降は徐々に減少する溶出型を示した（第 5-4 図）。

1996 年のロング区 (ロング 180) は、5 月から窒素溶出量が徐々に増加して 8 月に 6.8gm^{-2} のピークを示し、10 月には 1.5gm^{-2} まで減少した。

(2) 窒素溶脱量

ライシメーターからの浸透水量は、多雨に経過した 1994 年が $1,988\text{Lm}^{-2}$ 、比較的小雨だった 1996 年が $1,330\text{Lm}^{-2}$ となり、それぞれ流入水量に対して 76 %、70 % の排出割合となった（第 5-5 図）。

1994 年における浸透水中の硝酸態窒素濃度は、LP50 と LP140 を混合した LP

区において、5月上旬から7月上旬にかけて慣行施肥区より高濃度となり、 105mgL^{-1} のピークを示した。その後、LP区は7月中旬から10月中旬までは慣行施肥区より低濃度となったが、収穫後の10月下旬から12月中旬は慣行施肥区の濃度よりやや高くなった。

ロング区は8月下旬まで慣行施肥区よりやや低い濃度で経過し、8月に 82mgL^{-1} のピークを示した。LP区と同様に収穫後の10月下旬から12月中旬は、慣行施肥区の濃度より高くなった。

1996年における浸透水中の硝酸態窒素濃度は、4月から8月まで各区ともほぼ同様な変化を示した。慣行施肥区は6～7月に窒素供給量の少ないロング区と減肥区に比べてやや高い濃度を示した。減肥区は8月に慣行施肥区より高くなったが、9～10月には硝酸態窒素濃度が最も低くなった。ロング区は収穫後の10～12月に濃度が高くなる特徴を示した。

1994年の年平均窒素濃度は、慣行施肥区の 45.7mgL^{-1} に対しロング区は 42.7mgL^{-1} とやや低く、LP区は 47.7mgL^{-1} とやや高かった。1996年は、慣行施肥区の 22.3mgL^{-1} に対しロング区は 22.7mgL^{-1} と同等で、減肥区は 19.3mgL^{-1} とやや低かった（第5-8表）。

1994年の窒素溶脱量は、ロング区において4～10月の栽培期間中に 43.6gm^{-2} と慣行施肥区より少なかったが、休耕期にあたる11～3月では慣行施肥区より 4.9gm^{-2} 多くなった。LP区は5～6月の窒素溶脱量が多かったため、4～10月の窒素溶脱量は 48.7gm^{-2} と慣行施肥区よりやや多くなった。さらに、11～3月でも 8.4gm^{-2} と慣行施肥区より多くなった。

1996年の窒素溶脱量は、栽培期間中の4～10月にはロング区において 18.5gm^{-2} となり10月に多かった。また、減肥区は 15.7gm^{-2} であり慣行施肥区の82%の溶脱量となった。収穫後の11～3月はロング区が 7.8gm^{-2} と最も多い溶脱量を示した。

1年間の窒素溶脱量は1994年がLP区、ロング区、慣行施肥区の順に多く、それぞれ 57.1gm^{-2} 、 54.5gm^{-2} 、 52.7gm^{-2} となった。また、1996年はロング区、慣行施肥区、減肥区の順に多く、それぞれ 26.3gm^{-2} 、 23.7gm^{-2} 、 20.9gm^{-2} の溶脱量であった。

（3）窒素吸収量

1994 年におけるナガイモの収量は、慣行施肥区が 4.51kgm^{-2} と最も多く、次いでロング区の 4.30kgm^{-2} 、LP 区の 3.74kgm^{-2} の順となった（第 5-9 表）。乾物重はロング区と慣行施肥区がほぼ同量だったのに対し、LP 区が少なかった。窒素吸収量は、茎葉と芋の窒素含有率が高くて乾物重の多かった慣行施肥区が最も多く、 20.4gm^{-2} が吸収された。ロング区は芋の窒素含有率が低く、慣行施肥区より 4.4gm^{-2} 少なかった。LP 区は茎葉の窒素含有量が低く窒素吸収量は慣行施肥区より 6.3gm^{-2} 少なかった（第 5-10 表）。

1996 年の収量は、慣行施肥区が 6.75kgm^{-2} と最も多く、次いでロング区の 6.12kgm^{-2} 、減肥区の 6.00kgm^{-2} の順となった。乾物重は慣行施肥区、ロング区、減肥区の順に多く、茎葉の窒素含有率は減肥区が高く、芋の窒素含有率は慣行施肥区が高かった。窒素吸収量は、慣行施肥区が最も多く 28.1gm^{-2} が吸収された。ロング区は慣行施肥区より 4.1gm^{-2} 少なかった。また、減肥区は慣行施肥区より 6.0gm^{-2} 少なく慣行施肥区の 79 % に相当する窒素吸収量であった。

3) ナシに対する被覆肥料の施用効果

(1) 供試被覆肥料からの窒素溶出

被覆肥料区は、10 ～ 11 月に化成肥料に由来する 37.5g 基^{-1} の窒素溶出があり、混合した LPS100 からの窒素溶出は、2 月までほとんど認められなかった。3 月からわずかな溶出が始まり、5 月に急激な溶出が始まった。そして、ピークの 6 月には 1 か月間に施用量の 46 % に相当する 51.8g 基^{-1} が溶出し、5 ～ 6 月の 3 か月間で 80 % の窒素溶出が認められた。また、8 月から 9 月の収穫期に至っても溶出が続いた（第 5-6 図）。

(2) 窒素溶脱量

調査期間の 1992 ～ 1995 年の 4 年間では、年平均 $9,824\text{L 基}^{-1}$ の浸透水が得られ、排出割合は 40.1 ～ 55.5 % となった（第 5-7 図）。

浸透水の硝酸態窒素濃度は、慣行施肥区に比べ被覆肥料区が夏期に高く、冬期に低い傾向を示した。被覆肥料区では 1992 年は 9 ～ 1 月、1993 年は 5 ～ 12 月、1994 年は 2 ～ 12 月に慣行施肥区より濃度が高くなった。年平均の硝酸態窒素濃度は、1992 年が被覆肥料区で 16.8mgL^{-1} 、慣行施肥区で 17.1mgL^{-1} とほぼ同濃度だった以外は 1993 ～ 1995 年まで被覆肥料のほうが $3.0 \sim 5.4\text{mgL}^{-1}$ 高くなった。1992 ～ 1995 年の平均値でも慣行施肥区の 9.1mgL^{-1} に対し被覆肥料区は

12.3mgL⁻¹ となり 3.2mgL⁻¹ 高かった (第 5-11 表)。

1 年間の溶脱窒素量は、慣行施肥区が 89.1g 基⁻¹ に対し被覆肥料区は 120.4g 基⁻¹ となり、35 % の増加となった (第 5-12 表)。被覆肥料区は 1992 年 10 月～1993 年 1 月、1993 年 7～12 月、1994 年 7～12 月、1995 年 5～12 月に窒素溶脱量が慣行区より多くなった。

(3) 窒素吸収量

果実収量は被覆肥料区が 4 年間で 123.6kg 基⁻¹ と慣行施肥区よりやや少なく、新梢の伸長量も被覆肥料区が慣行施肥区より少なく生育が劣った (第 5-13 表)。また、果実品質には大きな差は認められなかった (第 5-14 表)。葉中窒素含量は、6～10 月まで被覆肥料区のほうが高く経過し、慣行施肥区より 1.4～2.0gkg⁻¹ 高くなった (第 5-15 表)。また、樹体乾物重は被覆肥料区が 85.9kg 基⁻¹ となり、慣行施肥区より 6.0g 基⁻¹ 少なかったが、樹体中の窒素含量が高いため、窒素吸収量はほぼ同等になった (第 5-16 表)。

4. 考 察

1) シバに対する被覆肥料の肥効と窒素溶脱への影響

シバの生育は 4 月から始まり、夏期の 8 月をピークに 10 月まで続く。生育初期は根茎の発達が不十分のため、窒素吸収量は最盛期の 20～50 % 程度とされ、過剰な施肥は窒素溶脱の増加につながる。秋期には徐々に吸収量が低下して休眠に至るとされ、秋期の過大な窒素肥効は耐病性や耐寒性を低下させる。従って、シバの理想的な窒素供給型は 8 月にピークを示す山型が良いとされている³¹⁾。シバの窒素吸収パターンに最も適合する被覆肥料の種類については明らかではないが、被覆肥料の窒素溶出特性を参考に 1995 年には LP70 と LPS100 を 6:4 に混合したものを供試した。この混合施用による窒素溶出量は、6 月までの生育初期に 4.3gm⁻² であり、慣行施肥区における施用量の 12.0gm⁻² に比べて少ない。生育最盛期の 8 月までには、被覆肥料区において 18.2gm⁻² が溶出し、慣行施肥区の 12.0gm⁻² より多くなる。さらに、生育後期では被覆肥料区が 2.8gm⁻² となり、慣行施肥区の 9.0gm⁻² よりかなり少ない。被覆肥料区のシバの生育は、4～6 月に慣行施肥区にやや劣ったものの、7～8 月には慣行施肥区より良好な生育が得られた。しかし、9～11 月は明らかに生育が劣り窒素吸収量は急減

する結果となった。このことから、被覆肥料区においては生育初期と後期の窒素溶出量が慣行施肥区に比べ不足していたことが伺われる。

1996 年の被覆肥料区は生育初期と後期に化成肥料を追加し、肥効の改善を図ろうとしたものである。被覆肥料区における窒素溶出量は、生育初期に 5.5gm^{-2} 、生育最盛期に 14.0gm^{-2} 、生育後期に 4.9gm^{-2} となり生育最盛期の溶出量が減少し、生育後期の溶出量が増加して前年より慣行施肥区の窒素供給型に近くなっている。これによるシバの生育変化は、生育初期には前年と大きな違いはなく、生育最盛期に窒素吸収量が減少して慣行施肥区並になった。生育後期は前年より窒素吸収量が増加したが、慣行施肥区には及ばなかった。これらの結果をみると、シバの窒素吸収量は各期間の窒素溶出量をよく反映したものとなっていたが、被覆肥料区と慣行施肥区では依然として窒素供給型に違いがあるため、吸収量に差を生じたものと考えられる。慣行施肥区においては、シバの生育全期間を通してかなり潤沢な窒素供給がされている。そのため、生育は全期間を通して旺盛となり、窒素吸収量も多くなっているが、窒素吸収量の少ない生育初期と後期には、やや施肥過多になっていると考えられる。

水稻に対する被覆肥料の施用効果として、窒素吸収の効率化によって 20 % 程度の減肥が可能とされている⁸⁴⁾。本試験において 20 % の減肥とした被覆肥料区の窒素吸収量は、慣行施肥区に対して 79 ~ 80 % となり、被覆肥料による窒素吸収量の増加は認められていない。また、施肥窒素寄与率は慣行施肥区の 55 ~ 61 % に対して、被覆肥料区は 47 ~ 51 % であり、施肥窒素吸収量は慣行施肥区の 67 % に止まっている。このことは 20 % の減肥を考慮しても、被覆肥料によって窒素吸収の効率化が図られたとは言えない。被覆肥料区における窒素吸収量低下の原因としては、9 月以降に少ない窒素供給量の影響が大きいと考えられる。また、同一施肥窒素量で被覆肥料区の窒素溶出を想定して分施した減肥区と比べても、被覆肥料区は夏期に窒素吸収量が多く 9 月以降は少なくなっており、予想以上に夏期に窒素肥効が集中し、秋期までの持続性に劣った影響と判断される。しかし、全期間の窒素吸収量は減肥区とほぼ同等となり、20 % の減肥によって 20 % 少ない窒素吸収量になったことから、被覆肥料区においては慣行の 11 回分施と同等の肥効が期待できると考えられる。水稻では、施肥回数が 2 ~ 3 回の慣行施肥と被覆肥料の全量一回施用を比較している。シ

バでは分施回数が多いため、被覆肥料による肥効の持続効果は現れにくいという違いがある。供試した被覆肥料の施用法では、全量 1 回施用による省力化には効果があるものの、慣行施肥を上回る窒素吸収は得られないと判断される。

¹⁵ Nトレーサー法によって求めた 1994 年の施肥窒素溶脱量は、慣行施肥区の 6.2gm^2 に対し被覆肥料区は 3.4gm^2 となり 55 %に減少した。浸透水の施肥窒素寄与率をみると、慣行施肥区は 7 ～ 8 月に 46 %だったのに対し、被覆肥料区は 28 %と明らかに低くなっている。1995 年の窒素溶脱量は、7 月にきわめて多く 1 か月間に慣行施肥区で 2.9gm^2 、被覆肥料区で 1.2gm^2 の施肥窒素が溶脱した。認められた施肥窒素溶脱量の差は、この時期の差が大きく、慣行施肥区では生育初期に施用した窒素が梅雨期の多量の降雨によって一度に溶脱したと考えられる。これに対し被覆肥料区は、慣行施肥区に比べ生育初期の窒素溶出量が少なかったため、溶脱量も少なくなったと考えられる。9 月以降の施肥窒素の溶脱は、被覆肥料区においては夏期に窒素溶出が最大となり、ピーク時には慣行施肥区を上回る窒素供給があったことから、浸透水の施肥窒素寄与率が 12 月まで徐々に増加している。しかし、夏期の旺盛なシバの吸収によって浸透水の窒素濃度には大きな上昇は認められず、10 月にやや増加したものの期間を通してみれば慣行施肥区と同等となっている。

1996 年は全期間を通じて慣行施肥区より浸透水の窒素濃度が低く、施肥窒素の溶脱が前年よりさらに減少して慣行施肥区の 28 %の施肥窒素溶脱量となった。被覆肥料区の窒素供給型がよりシバの窒素吸収型に近づいたことも、窒素溶脱量が減少した要因と考えられる。これらの結果は、シバの生育量に応じた窒素供給であれば窒素溶脱量を最小限に止められることを示唆している。

土壌残存窒素量は 2 年とも被覆肥料区で少なく、慣行施肥区に対して 1995 年は 80 %、1996 年は 68 %が残っており、残存窒素量は減肥分を考慮すると大きな違いはないと考えられる。¹⁵ Nトレーサー法で得られた窒素溶脱量、吸収窒素量、残存窒素量の合計は施肥窒素量に対して、被覆肥料区で 80 ～ 81 %、慣行施肥区で 92 ～ 98 %となり被覆肥料区において行方不明の割合が多かった。この原因については不明であるが、シバ栽培においてはいくつかの特殊な条件がある。シバへの被覆肥料の施用法は表層散布であり、耕耘しないため肥料の粒が地表面に露出した状態となる。このような環境はシバ特有の条件であ

り，被覆肥料の窒素溶出が乱れる可能性もある．また，施用にあたっては降雨強度が大きいと地表水の移動に伴って肥料が流れて移動することも観察されており，傾斜のあるほ場では損失が大きくなる可能性がある．さらに，茎葉の刈り込み時に作業機械の踏圧がかかり，刈草の取り込み時に肥料も一緒に取り除かれる危険もある．これらの点については今後さらに検討する必要がある．

シバに対する被覆肥料の施用は，施肥回数の削減による省力効果が大きい．窒素吸収については好適な溶出タイプを選定することで，慣行施肥並の肥効が期待できる．さらに，窒素溶脱については軽減できる傾向を示しており，よりシバの窒素吸収型に近づけることが地下水の硝酸汚染に対して有効な方法と考えられる．

2) ナガイモに対する被覆肥料の肥効と窒素溶脱量への影響

ナガイモの生育は5月に植え付け後，6～7月に茎葉が伸長し8月には最大の繁茂状態に達する．慣行施肥における施肥法は，年間施肥窒素量 40gm^2 を4～9月に11回に分施し，月毎の施肥割合は，4～5月に 4.0gm^2 ，6月に 10.8gm^2 ，7月に 14.4gm^2 ，8月に 8.8gm^2 ，9月に 2.0gm^2 となっている．ナガイモでは茎葉伸長期に窒素供給を多くすることが重要であるとされ⁹⁷⁾，慣行施肥では6月から窒素供給を促進し，7月をピークに8月までは潤沢な供給をし，9月に切り上げる供給型になっている．

1994年に供試したロング140の5月施用は，7月に溶出量が最大となり9～10月にかけても窒素溶出が続き，慣行施肥区より生育後半の窒素供給量が多くなると予想される．浸透水の窒素濃度をみても，10月下旬から12月中旬に濃度上昇が認められており，9月上旬に最後の追肥を行った慣行施肥区より収穫後に多くの窒素溶脱を生ずる結果となった．このことから，ナガイモに対してはロング140の5月施用では窒素溶出が遅くまで続くため窒素吸収量が減少し，収穫後に窒素溶脱が多くなると考えられる．一方，LP50とLP140を等量混合したLP区は，生育初期の5～6月に窒素溶出量が多くなる．浸透水の硝酸態窒素濃度は5月中旬から7月上旬に慣行施肥区より高くなり，窒素溶脱量の増加に影響したと考えられる．

1996年は，1994年に供試したロング140の結果を考慮してロング180を用いて約40日早く施用したものである．しかし，得られた窒素溶出型は，6～8

月の溶出量が慣行施肥に比べやや少なく、9～10月の溶出量はやや多い結果となった。浸透水中の硝酸態窒素濃度は、7月まではやや低かったが、1994年のロング140の場合と同様に収穫後の10～12月に慣行施肥区の濃度を上回った。したがって、ロング180の4月施用でも窒素の溶出が遅くまで続き過ぎると考えられ、収穫後の窒素溶出が溶脱量の増加を引き起こしたものと判断できる。同一施肥窒素量の減肥区と比較しても、8月までの窒素溶脱量には差が認められなかったが、9月以降はロング180での溶脱量が多くなっており、想定した以上に生育後期の窒素溶出が多くなると考えられる。

林⁹³⁾は被覆肥料（ロング140，ロング180）を用いて減肥をしたナガイモ生育期間の調査において、土壌溶液中の硝酸態窒素濃度が慣行施肥に比べ少なく、窒素溶脱量の軽減に効果があるだろうとしている。本試験の結果をみると、これらの被覆肥料の施用による窒素溶脱は、むしろ収穫後に顕著に認められることから、今後は土壌残存量を含めた通年にわたる評価が重要と考えられる。

佐藤ら³⁶⁾は本試験と同様の調査において、ロング100では生育後半に窒素供給が不足し、ロング140では生育初期の窒素供給が不足するとしている。また、砂丘畑では肥料の種類以上に多雨条件で窒素溶脱が多くなることを指摘している。本試験においても、ナガイモに対する被覆肥料の効果はほぼ同様の結果となり、供試被覆肥料はナガイモの窒素吸収型に合致するものではなかったと評価できる。省力化のための全量1回施用を前提とするならば、生育初期の窒素供給として化成肥料や溶出期間の短い50～70日タイプの被覆肥料、生育最盛期の窒素供給として初期溶出抑制型の100日タイプの被覆肥料、生育後期の窒素供給として140日タイプの被覆肥料を混合して用いることが有効であると考えられる。窒素溶脱が速やかとされる砂丘畑においては、ナガイモの窒素吸収型と被覆肥料の窒素溶出型に少しのずれが生じても、窒素溶脱を助長する危険がある。窒素溶脱軽減のためには、他の土壌以上に適合性を高める必要がある。

被覆肥料は窒素溶出の持続性に優れる反面、速効性や窒素供給の切り上げに対しては制御しにくく、ナガイモのように6か月間の窒素供給を1回の施肥で対応するためには、異なる溶出特性を持った肥料を組み合わせ、ナガイモの窒素吸収型にできるだけ近づけることが、窒素溶脱量の軽減に役立つものと考え

えられる。本試験で供試した被覆肥料は、慣行施肥区の窒素供給型を理想とすると、いずれも溶出時期の早晚を生じており、供試した被覆肥料では窒素溶脱の軽減効果は得られなかった。利用にあつたては、被覆肥料の種類選定をさらに検討する必要がある。

3) ナシに対する被覆肥料の肥効と窒素溶脱への影響

ナシの中生品種の時期別窒素吸収量は、5～7月と10～11月に多く、収穫前の8月には少ない吸収型を示すとされている⁹⁸⁾。ナシの理想とする窒素供給型としては5～6月の展葉期にかけては、窒素を積極的に供給し、十分に展葉を促した後、早期に伸長を停止させ、収穫前の8月には窒素吸収をできるだけ抑制させることで、着色促進と糖度向上を図ることとされている。そして、収穫後には樹体内養分蓄積のため10～11月にかけて再び窒素供給を促進し、休眠期に至ることが、理想的とされている⁹⁹⁾。

供試した被覆肥料区では、10～12月に化成肥料とLPS100から 37.5g 基^{-1} 、5～7月にLPS100から 92g 基^{-1} の窒素供給が見込まれる。一方、慣行施肥区では10～12月に9月下旬施肥窒素と12月上旬施肥窒素（無機態）から 55g 基^{-1} 、5～7月に12月上旬施用窒素（有機態）と6月上旬施用窒素から 35g 基^{-1} の窒素供給が予想される。小松ら⁶⁰⁾の報告によると、秋冬期に施用した窒素の溶脱量が多いとされることから、本試験の被覆肥料区では10～12月の窒素供給量をやや少なくし、5～7月を多くして窒素溶脱量の減少を見込んだ。しかし、実際の窒素溶出量は、被覆肥料区において夏期の窒素溶出量が予想以上に多くなったため、慣行施肥区とはかなり異なった窒素供給型となった。

窒素溶脱量についてみると、慣行施肥区に比べ被覆肥料区は浸透水中の硝酸態窒素濃度が高く、窒素溶脱量が35%も増加する結果となった。両区の窒素溶脱量の時期変化は、2～4月には慣行施肥区の窒素溶脱量が多く、7～12月には被覆肥料区が多くなっている。慣行施肥区は秋冬期の窒素施用量が多かったこと、被覆肥料区は夏期の窒素溶出が多かったことが溶脱量の差となったと考えられる。

慣行施肥区と被覆肥料区との窒素溶脱量の差が大きかった年は、1994年の 51.4g 基^{-1} 、1995年の 38.7g 基^{-1} 、1993年の 37.1g 基^{-1} であり、1992年には差がほとんど認められていない。最も差が大きかった1994年は、慣行施肥区におい

て土壤中の窒素含量が高まる 2 ～ 4 月に降水量が少なく、被覆肥料区において土壤中の窒素含量が高まる 7 月 ～ 12 月に降水量が多かった年である。また、最も差が少なかった 1992 年は、2 月に降水量が多く、7 ～ 12 月は比較的降水量が少ない年であった。得られた窒素溶脱量の年次差は、土壤中の窒素濃度が高まる時期とその時の降水量によって変化したものと考えられる。

当初、本試験では秋期に高度化成肥料と被覆尿素 LPS100 を混合施用することで、慣行施肥区と同等の窒素吸収量と窒素溶脱量の軽減を見込んでいた。窒素吸収量は、ほぼ同等となったものの、葉中窒素含量の変化から被覆肥料区の窒素吸収は、慣行施肥区の窒素供給型とは異なり、夏期に窒素供給が集中する供給型となった。供試した被覆尿素 LPS100 は、秋冬期の窒素溶脱は慣行施肥より少なく、窒素溶脱軽減に効果が認められたが、夏期に窒素溶出が集中し過ぎるため、その後の窒素溶脱は増加し、1 年間の窒素溶脱量は慣行施肥区より多くなる考えられる。

これまで、果樹栽培に適した被覆肥料は、樹体生育や果実品質を重点に選定されてきた^{87,94 ～ 96)}。ナシ¹⁰⁰⁾では、慣行施肥と同等の果実品質が得られる被覆肥料として、LP70 の秋期全量施用が最も適するとされている。これは、秋期から春期において LP70 の窒素肥効が比較的高く、収穫期まで肥効を残さないためと判断される。しかし、LP70 は、慣行施肥と同様に冬期にかなりの窒素溶出があるため、窒素溶脱に関しては大きな改善は見込めない。これに対し、本試験で用いた LPS100 のような初期溶出抑制型の被覆肥料を用いれば、秋冬期の過剰溶出が抑えられ、2 ～ 4 月の窒素溶脱を軽減できると考えられる。また、LPS100 の施用量を夏期の肥効が慣行施肥並になるように減肥することで、7 ～ 12 月の溶脱量を減少できると考えられる。今後、ナシへの被覆肥料の利用にあたっては、有効な被覆肥料を組み合わせ、樹体生育や果実品質に加え、窒素溶脱量をできるだけ少なくできる肥料の選択が重要といえる。

第5-1表 シバの窒素施用法

調査年	処理区分	窒素施肥量 (gm ⁻²)						計
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	
1995年	被覆肥料区	26 ^c	0	0	0	0	0	26
	減肥区	1.5 ^a	4 ^b	4 ^b	6 ^b	6 ^a	4.5 ^a	26
	慣行施肥区	3 ^a	6 ^b	6 ^b	6 ^b	6 ^a	6 ^a	33
1996年	被覆肥料区	18 ^c	2 ^b	1 ^b	0	2 ^a	3 ^a	26
	慣行施肥区	3 ^a	6 ^b	6 ^b	6 ^b	6 ^a	6 ^a	33

a: 燐硝安カリ S 604 (16-10-14)

b: A M化成 (15-15-15)

c: 被覆尿素LP70とLPS100を6:4に混合 (40-0-0)

第5-2表 ナガイモの窒素施用法

調査年	処理区分	窒素施用量 (gm ⁻²)						計
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	
1994年	ロング区	4 ^a	36 ^c					40
	LP区	40 ^c						40
	慣行施肥区	4 ^a		10 ^{a b c}	15 ^{b c}	9 ^{b c}	2 ^b	40
1996年	ロング区	32 ^f						32
	減肥区	4 ^a		6 ^b	9 ^c	8 ^{b c}	5 ^b	32
	慣行施肥区	4 ^a		11 ^b	14 ^c	9 ^{b c}	2 ^b	40

a: IBs₁ (10-10-10)

b: ナガイモ複合 (12-15-18)

c: 尿素燐加安 (18-8-16)

d: ロング140 (13-3-11)

e: LP50+LP140 (等量混合, 40-0-0)

f: ロング180 (13-3-11)

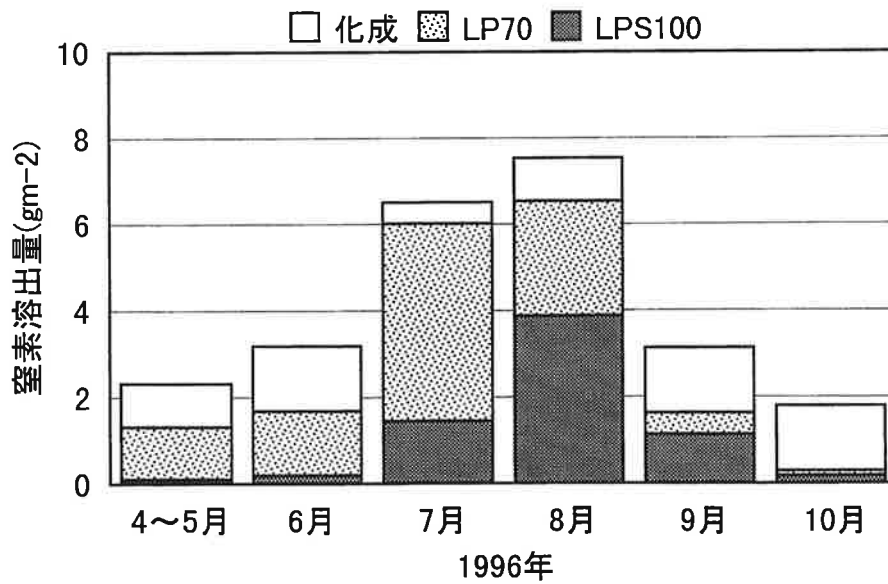
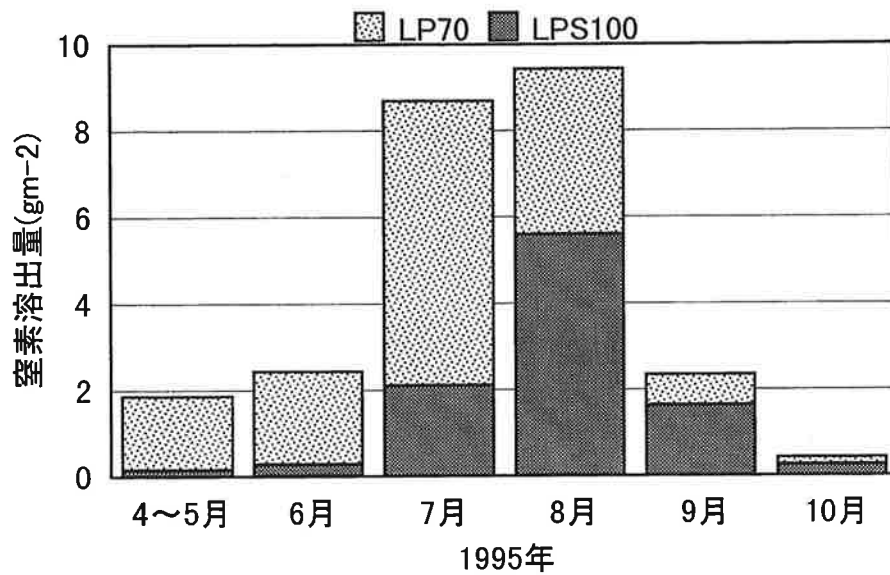
第5-3表 ナシの窒素施用法 (1992~1996年)

処理区分	窒素施用量 (g基 ⁻¹)					計 (gm ⁻²)
	3月上旬	6月上旬	9月下旬	12月上旬		
被覆肥料区			150 ^a			150 (16.7)
慣行施肥区	15 ^b	15 ^c	45 ^d	75 ^c		150 (16.7)

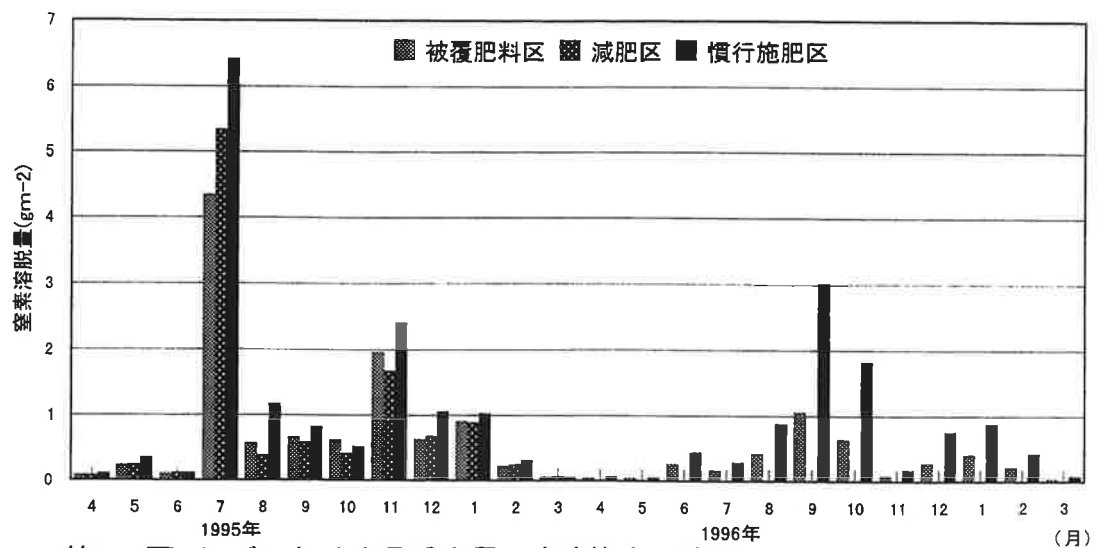
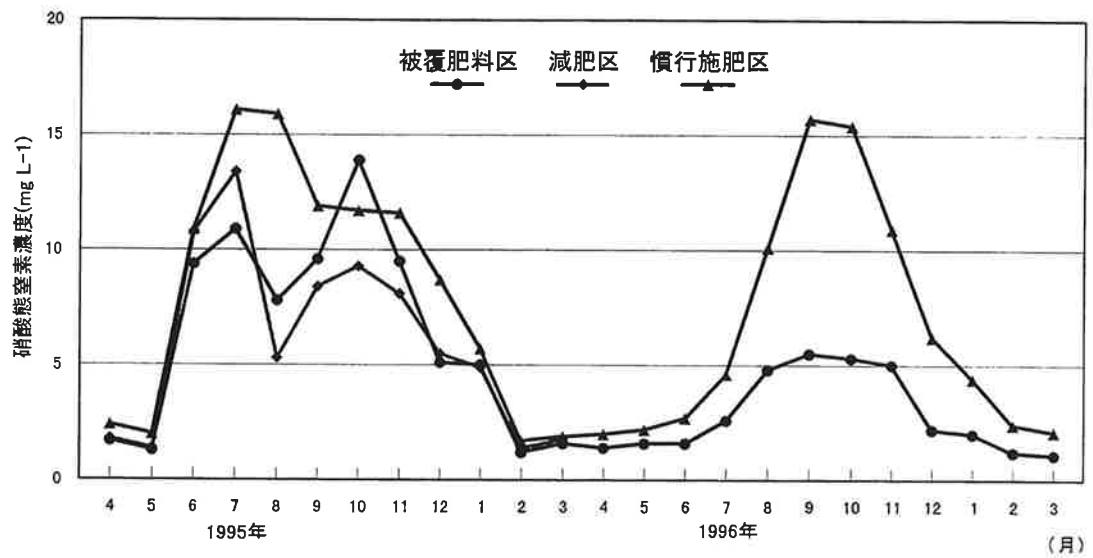
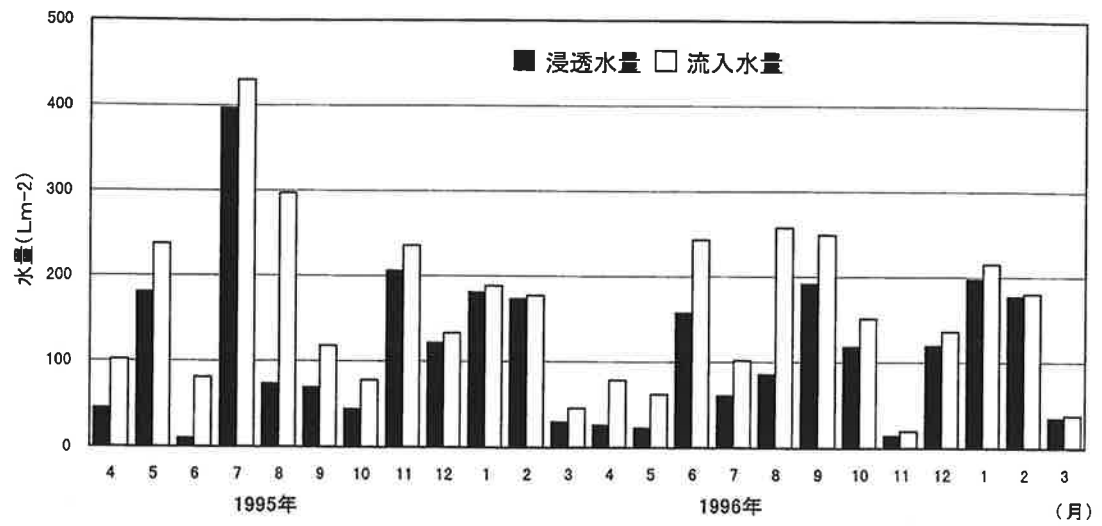
a: LPS100 (40-0-0) 112.5gと燐加安S550 (15-15-10) 37.5gを混合施用

b: 燐硝安カリ S604 (16-10-14) c: 有機入り化成 (8-5-6)

d: 燐加安S550 (15-15-10)



第5-1図 シバ被覆肥料区における供試肥料からの窒素溶出量



第5-2図 シバにおける浸透水量, 硝酸態窒素濃度, 窒素溶脱量の推移

第5-4表 シバにおける浸透水の硝酸態窒素濃度と窒素溶脱量

調査年	処理区分	硝酸態窒素濃度 (mgL ⁻¹)	窒素溶脱量 (gm ⁻²)
		年平均 (範囲)	
1995年	被覆肥料区	6.7(1.2~13.9)	10.4
	減肥区	7.0(1.4~13.4)	10.7
	慣行施肥区	9.3(1.7~15.9)	14.4
1996年	被覆肥料区	3.1(1.1~ 5.5)	3.6
	慣行施肥区	7.5(2.0~15.7)	7.8

第5-5表 シバの乾物重と窒素吸収量

調査年	処理区分	茎葉根乾物重 (gm ⁻²)				窒素吸収量 (gm ⁻²)			
		4~6月	7~8月	9~11月	計	4~6月	7~8月	9~11月	計
1995年	被覆肥料区	545	634	248	1,427	8.8	10.7	1.3	20.8
	減肥区	484	546	306	1,336	7.3	8.6	5.8	21.8
	慣行施肥区	611	578	324	1,513	11.2	8.7	6.3	26.2
1996年	被覆肥料区	468	815	284	1,567	8.4	12.1	4.8	25.4
	慣行施肥区	553	898	418	1,869	11.0	13.2	7.5	31.7

第5-6表 ^{15}N トレーサー法によるシバの施肥窒素寄与率と施肥窒素吸収量

調査年	処理区分	施肥窒素寄与率* (%)				施肥窒素吸収量** (g m^{-2})			
		4~6月	7~8月	9~11月	平均	4~6月	7~8月	9~11月	計
1995年	被覆肥料区	41.1	57.7	2.3	47.1	3.6	6.2	0.03	9.8
	慣行施肥区	46.7	51.4	77.2	55.4	5.2	4.5	4.9	14.6
1996年	被覆肥料区	51.6	52.2	48.6	51.3	4.4	6.3	2.3	13.0
	慣行施肥区	60.4	56.9	69.2	61.0	6.6	7.5	5.2	19.3

* 施肥窒素寄与率(%) = シバの ^{15}N atom% excess ÷ 肥料の ^{15}N atom% excess × 100

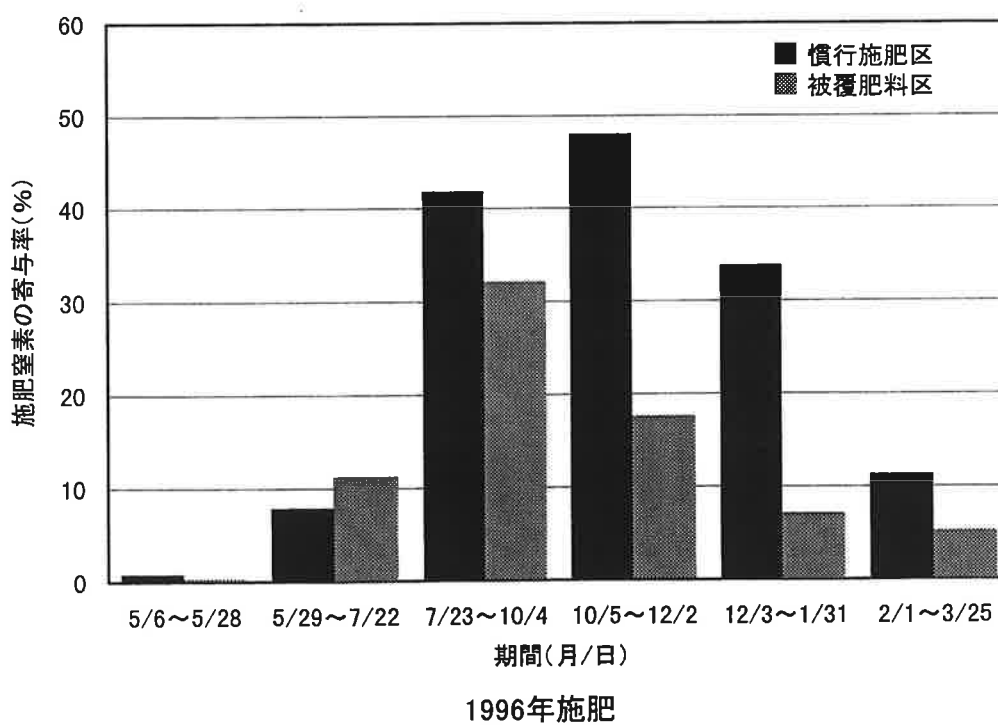
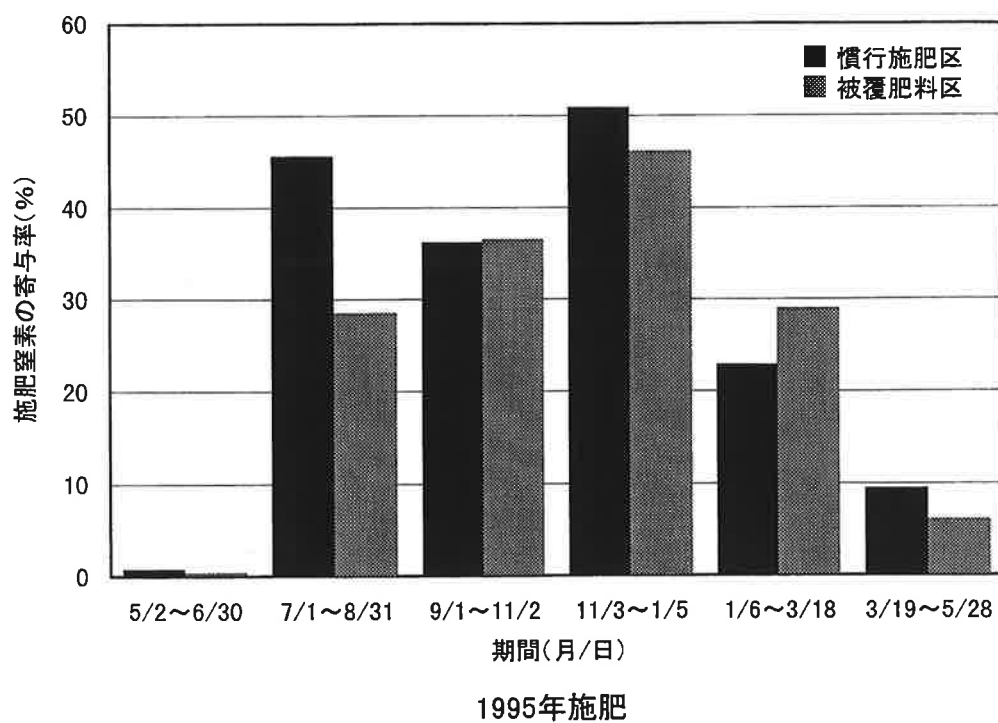
** 施肥窒素吸収量 = 窒素吸収量 × 施肥窒素寄与率

第5-7表 ^{15}N トレーサー法による施肥窒素の土壌残存量

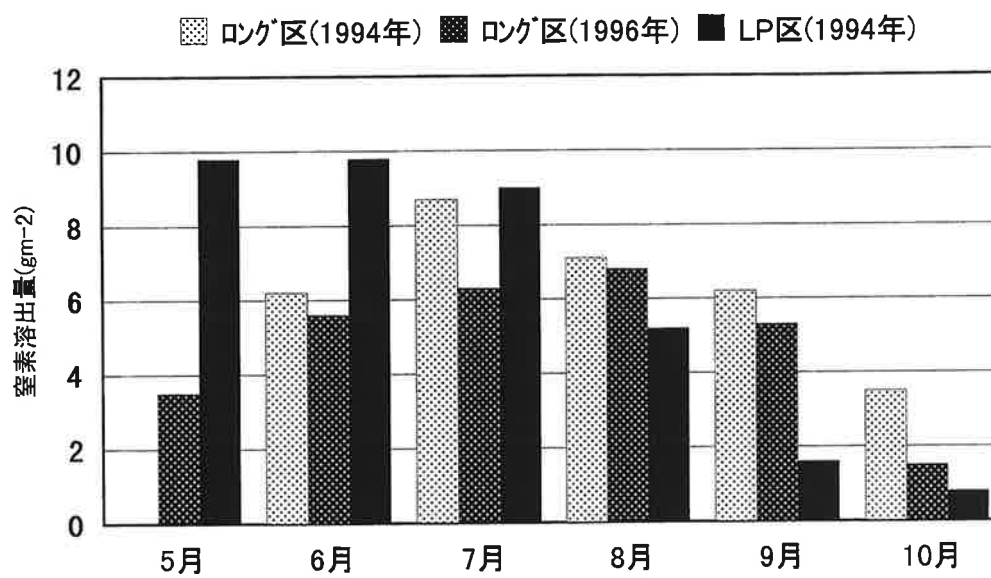
年	処理区分	全窒素量 (g m^{-2})	施肥窒素寄与率* (%)	施肥窒素残存量** (g m^{-2})
1995	被覆肥料区	1,208	0.62	7.52
	慣行施肥区	1,186	0.80	9.43
1996	被覆肥料区	1,218	0.60	7.31
	慣行施肥区	1,198	0.83	10.80

* 施肥窒素寄与率(%) = 土壌の ^{15}N atom% excess ÷ 肥料の ^{15}N atom% excess × 100

** 施肥窒素残存量 = 各層位の全窒素量 × 施肥窒素寄与率

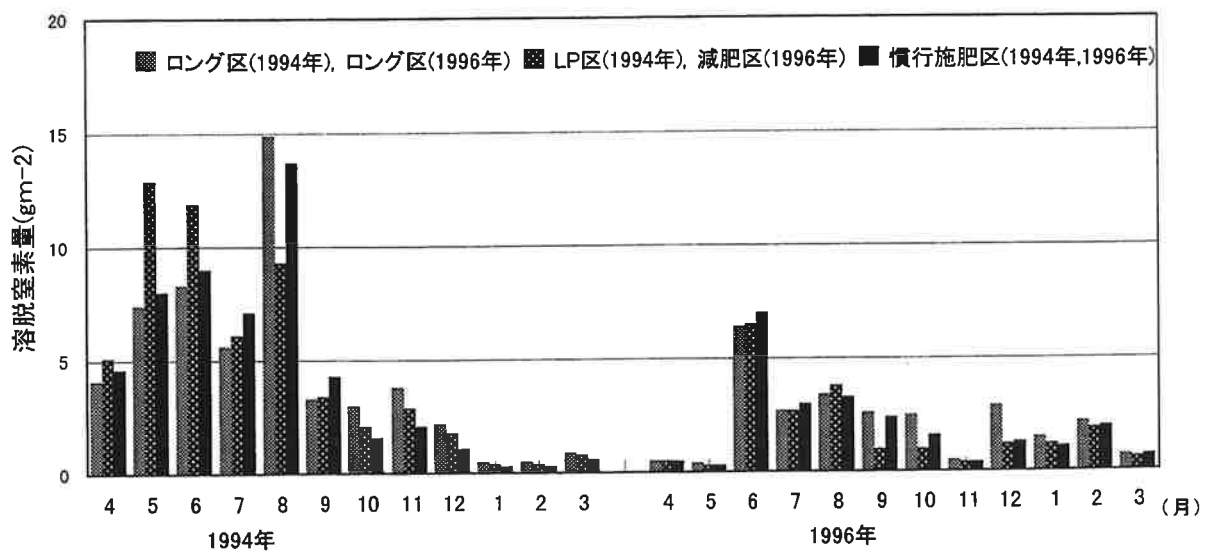
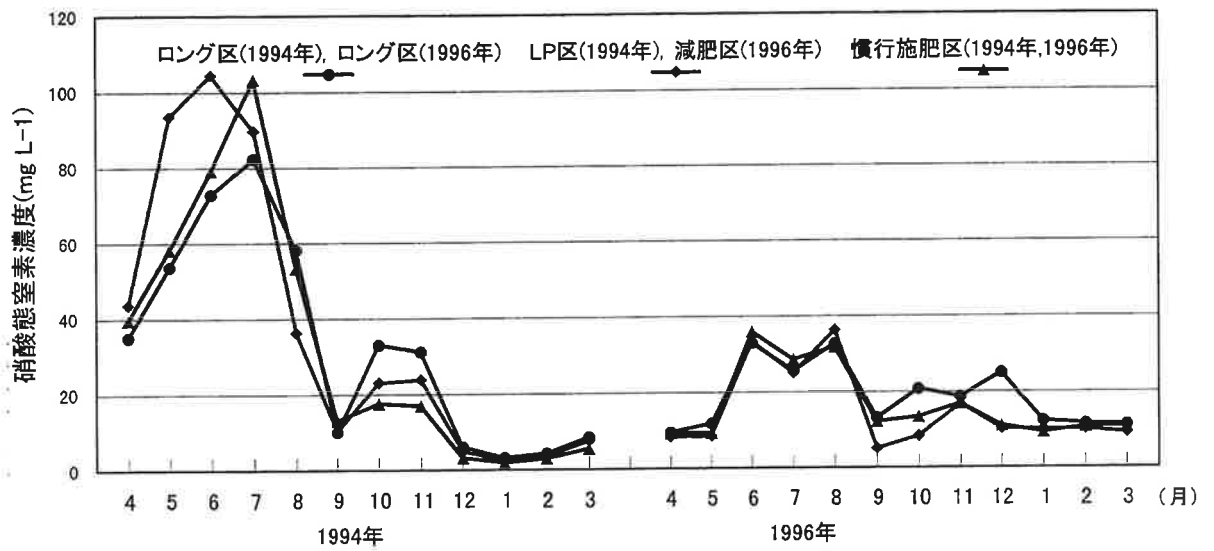
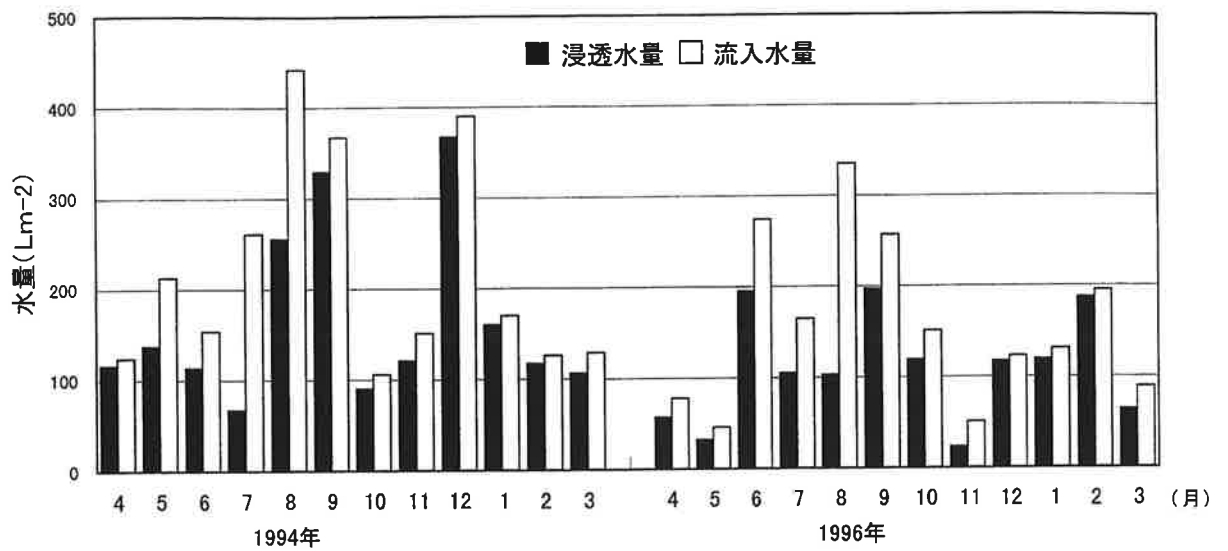


第5-3図 浸透水中の施肥窒素寄与率の変化



第5-4図 ナガイモ供試被覆肥料からの窒素溶出量

注) ロング区: 1994年はロング140の5月施用, 1996年はロング180の4月施用
 L P 区: LP50とLP140の5月混合施用



第5-5図 ナガイモ被覆肥料区における浸透水量, 硝酸態窒素濃度, 窒素溶脱量の推移

第5-8表 ナガイモにおける浸透水の硝酸態窒素濃度と窒素溶脱量

調査年	処理区分	硝酸態窒素濃度 (mgL ⁻¹)		窒素溶脱量 (gm ⁻²)		
		年平均 (範囲)		4~10月	11~3月	計
1994年	ロング区(ロング140)	42.7	(3.1~83.2)	43.6	10.9	54.5
	L P 区	47.7	(2.5~104.4)	48.7	8.4	57.1
	慣行施肥区	45.7	(1.8~103.2)	46.7	6.0	52.7
1996年	ロング区(ロング180)	22.7	(9.4~32.9)	18.5	7.8	26.3
	減 肥 区	19.3	(8.3~36.3)	15.7	5.2	20.9
	慣行施肥区	22.3	(9.3~35.8)	18.2	5.5	23.7

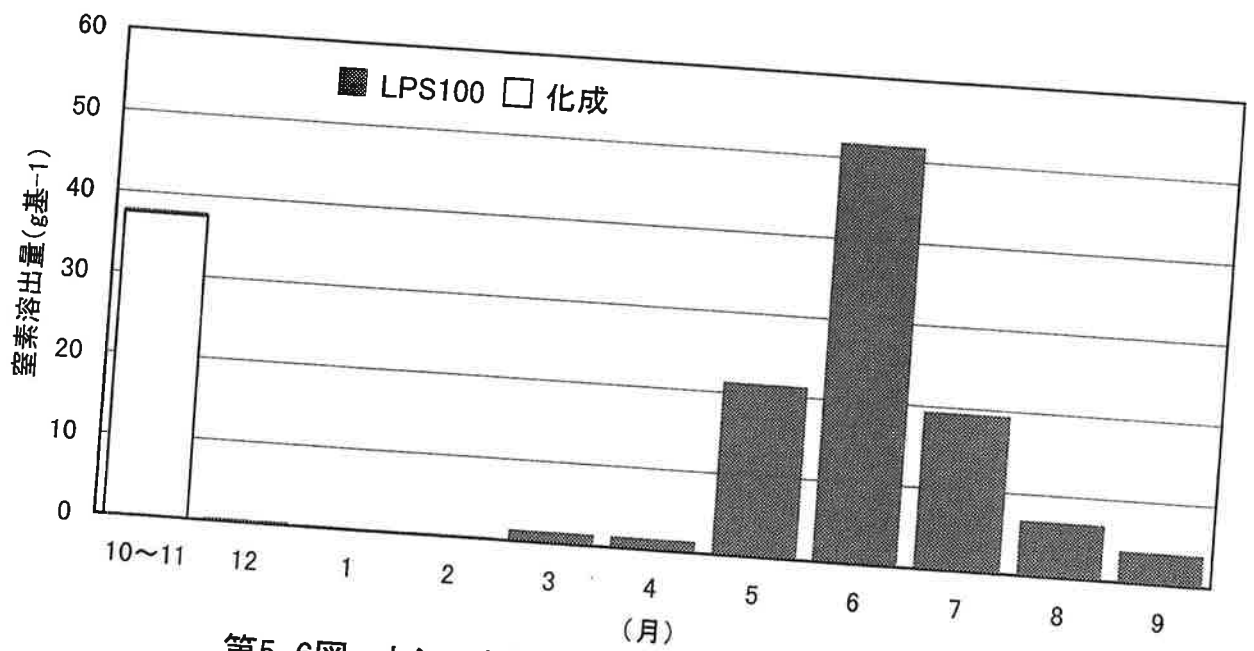
第5-9表 ナガイモの収量と品質

調査年	処理区分	平均芋長	平均芋重	芋 数	芋収量
		(cm)	(g)	(本m ⁻²)	(kgm ⁻²)
1994年	ロング区(ロング140)	73.5	694	6.2	4.30
	L P 区	72.7	594	6.3	3.74
	慣行施肥区	74.5	717	6.3	4.51
1996年	ロング区(ロング180)	64.3	799	7.7	6.12
	減 肥 区	60.1	856	7.0	6.00
	慣行施肥区	66.7	972	6.9	6.75

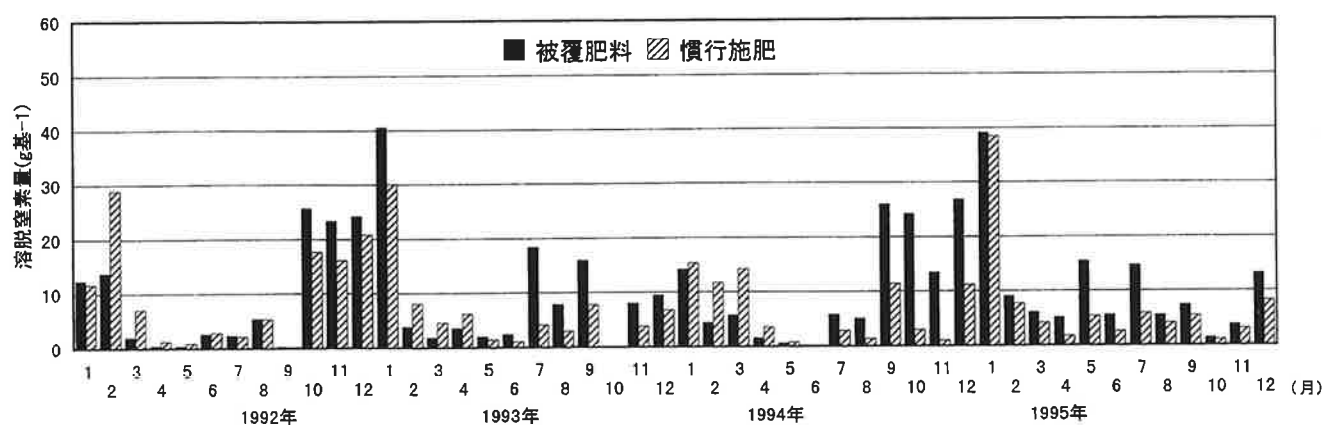
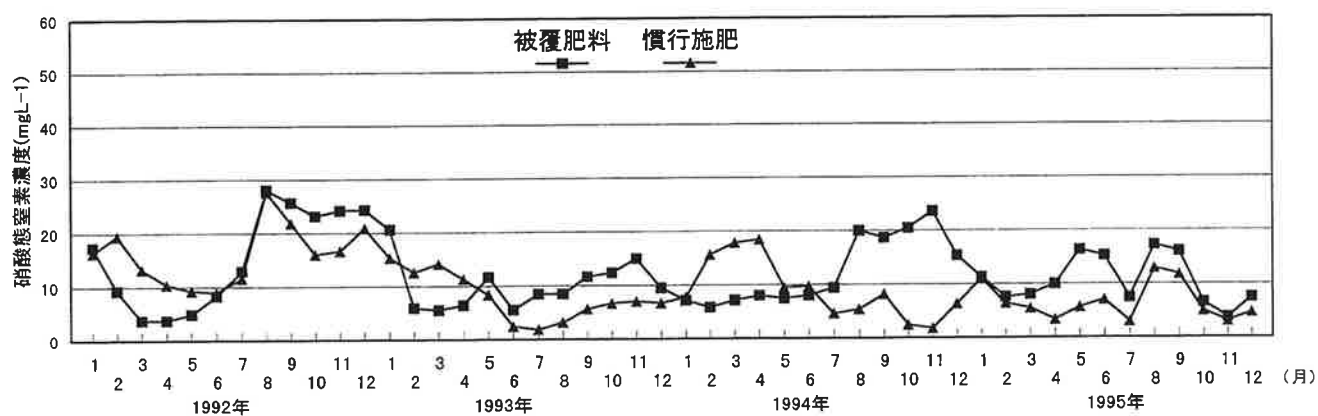
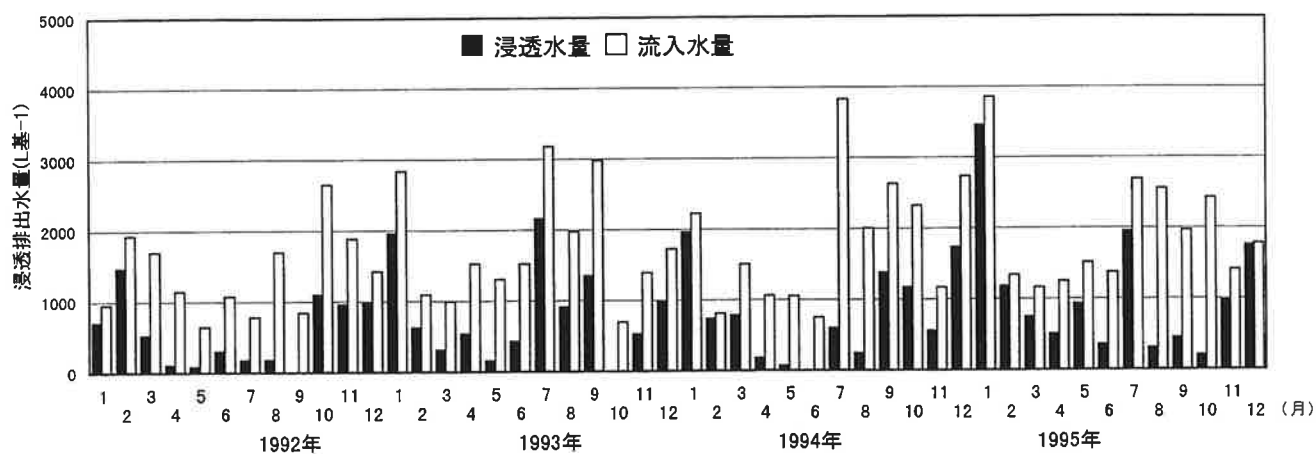
第5-10表 ナガイモの乾物重と窒素吸収量

調査年	処理区分	乾物重 (gm ⁻³)			窒素含有率 (%)			窒素吸収量 (gm ⁻²)		
		茎葉	芋	計	茎葉	芋	計	茎葉	芋	計
1994年	ロング区(ロング140)	167	666	833	2.52	1.78		4.21	11.85	16.06
	L P 区	150	559	709	2.40	1.89		3.60	10.57	14.17
	慣行施肥区	161	664	825	2.55	1.98		4.10	16.34	20.44
1996年	ロング区(ロング180)	309	1,383	1,693	1.46	1.41		4.52	19.50	24.02
	減肥区	281	1,230	1,511	1.61	1.43		4.52	17.59	22.11
	慣行施肥区	244	1,485	1,729	1.37	1.67		3.34	24.80	28.14

注) 茎葉試料の採取は1998年が8月, 1996年が9月, 芋試料の採取は10月に行った.



第5-6図 ナシの被覆肥料区における窒素溶出量



第5-7図 ナシの被覆肥料区における浸透水量, 硝酸態窒素濃度, 窒素溶脱量の推移

第5-11表 ナシにおける浸透水の硝酸態窒素の年平均濃度 (mgL⁻¹)

処理区分	1992年		1993年		1994年		1995年		1992～1995年	
	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)	平均濃度 (範囲)
被覆肥料区	16.8 (3.8～28.1)	11.3 (5.6～20.6)	13.4 (5.9～23.6)	9.8 (3.8～17.3)	12.3 (3.8～28.1)					
慣行施肥区	17.1 (9.0～27.7)	7.6 (1.9～15.3)	8.0 (1.8～18.5)	6.8 (3.0～12.9)	9.1 (1.8～27.7)					

第5-12表 ナシにおける窒素溶脱量

処理区分	窒素溶脱量 (N g基 ⁻¹)				
	1992年	1993年	1994年	1995年	合計 (平均)
被覆肥料区	113.1	113.9	128.1	126.6	481.7
慣行施肥区	115.0	76.8	76.7	87.9	356.4

第5-13表 ナシ樹の果実収量と樹体生育量

処理区分	果実収量 (kg基 ⁻¹)				新梢伸長量 (m基 ⁻¹)				
	1992年	1993年	1994年	1995年	計	1992年	1993年	1994年	1995年 計
被覆肥料区	11.0	31.0	40.1	41.5	123.6	35.0	60.1	61.3	111.1
慣行施肥区	14.1	36.4	44.7	48.4	143.6	39.1	62.8	84.0	146.2

第5-14表 ナシの果実品質

処理区分	調査日 (年. 月. 日)	平均果重 (g)	果色 (カラ-チャート値)	糖度 (brix%)	果肉硬度 (kgcm ⁻²)
被覆肥料区	1993. 9. 16	263	3.0	9.7	0.82
	1994. 9. 12	240	3.1	11.6	0.95
	1995. 9. 13	247	3.0	11.2	0.80
慣行施肥区	1993. 9. 16	269	3.0	9.7	0.86
	1994. 9. 12	278	3.2	11.8	0.92
	1995. 9. 13	259	3.0	11.7	0.83

第5-15表 ナシ樹の葉中窒素含量 (gkg⁻¹)

処理区分	1992年			1993年			1994年			1995年			平均		
	6月	8月	10月	6月	8月	10月	6月	8月	10月	6月	8月	10月	6月	8月	10月
被覆肥料区	31.9	29.5	24.2	29.4	28.7	22.1	27.6	26.3	24.2	31.0	26.0	23.5	30.0	27.6	23.5
慣行施肥区	30.0	27.7	24.2	27.0	26.7	21.6	27.0	25.1	20.9	28.0	23.2	21.5	28.0	25.7	22.1

第5-16表 処理期間におけるナシ樹の樹体乾物重と窒素吸収量

処理区分	項目	離脱物 (1992~1994)				樹体 (1995)				合計
		果実	落葉	せん定枝	小計	果実	葉	枝	根	
被覆肥料	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	20.5	6.2	7.3	34.0	9.8	4.8	25.3	12.0	51.9
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	46.8	135.5	48.2	230.5	23.2	105.5	176.2	80.0	384.9
慣行施肥	樹体乾物重 (kg基 ⁻¹)	21.2	6.8	7.8	35.8	11.1	5.0	27.6	12.4	56.1
	窒素吸収量 (g基 ⁻¹)	48.7	135.8	51.0	235.4	25.6	99.7	179.4	80.6	385.3

第 6 章 総合考察

1. シバ、ナガイモ、ナシ栽培における窒素溶脱の実態

本研究では、ライシメーター試験により黒ボク土シバ畑（第 2 章）、砂質土ナガイモ畑（第 3 章）、黒ボク土ナシ園（第 4 章）における窒素溶脱量と窒素収支を明らかにした。窒素溶脱について、得られた結果をまとめると第 6-1 表のようである。

深さ約 1 m における浸透水の年平均硝酸態窒素濃度は、シバ畑で $5.8 \sim 9.3\text{mgL}^{-1}$ 、ナガイモ畑で $17.8 \sim 28.9\text{mgL}^{-1}$ 、ナシ園で $6.8 \sim 13.0\text{mgL}^{-1}$ となった。環境基準項目に設定されている硝酸態窒素濃度 10mgL^{-1} と比較すると、シバ畑では基準以下、ナガイモ畑では基準をかなり上回る値、ナシ園では基準以下もしくは年によって基準を上回る値と判断できる。平均濃度だけでみると、シバ畑とナシ園においては、現状の慣行施肥でも窒素溶脱によって地下水に対して大きな濃度上昇をもたらすとは考えにくい。しかし、ナガイモ畑においては、早急な改善を要する濃度であると判断できる。

硝酸態窒素濃度は各作物とも時期変動があり、それぞれ特徴的な変化が認められている。シバ畑では、5 月から徐々に濃度が上昇して 8 月にピークとなって減少し、2 月に最低となる時期変動を示した。硝酸態窒素濃度が 10mgL^{-1} を越える時期は、夏期を中心とした 3～6 か月間であり、それ以外の時期は $1 \sim 2\text{mgL}^{-1}$ と低濃度で推移していた。濃度の上昇は 4～9 月に定期的に施用される施肥窒素の影響と思われる。とくに、生育初期はシバの窒素吸収がまだ少ないので、この時期の施肥による溶脱の危険が高いと考えられる。

ナガイモ畑では、5 月から濃度が急激に増加して 7 月にピークを示した。その後、秋期には減少して冬期に最低となる季節変化を示し、冬期の 1～3 月以外の期間は常に 10mgL^{-1} を超える濃度であった。従って、浸透水の濃度上昇は、4 月からの施肥が大きく影響していると考えられる。林の調査⁹³⁾でも一般ほ場において、根域下層の土壌溶液中の硝酸態窒素濃度が 100mgL^{-1} を越えており、施肥による窒素溶脱が多い実態にあると言える。

ナシ園においては、冬期に徐々に濃度が上昇して、翌春の 3～4 月に最大となる変化を示し、冬期から春期にかけて 10mgL^{-1} を越えた。その後、夏期にや

や上昇し秋期に最低となる季節変化を示した。3～4月の濃度上昇は、秋冬期の施肥による影響と考えられる。ライシメーター試験での値は、清耕条件で溶脱しやすい化成肥料を用いていることからみて、最大値に近い値とみなされる。一般ナシほ場においては、放任型の雑草草生栽培が多く、第3章第2節で得られたような牧草草生状態での窒素溶脱軽減効果には及ばないものの、いくらかの低減は見込める。また、冬期の施肥は有機質肥料が多用され、土壌中の硝酸濃度が化成肥料に比べ低濃度で経過することからも、ナシほ場における窒素溶脱は得られた値ほど多くないものと推察される。

1年間の窒素溶脱量は、シバ畑で $8.8 \sim 14.4 \text{ gm}^2$ 、ナガイモ畑で $23.7 \sim 52.7 \text{ gm}^2$ 、ナシ園で $7.3 \sim 13.5 \text{ gm}^2$ となった。これらのことから、窒素の溶脱は砂丘ナガイモ畑においてきわめて多いこと、黒ボク畑のシバ畑とナシ園においてはほぼ同等であることが確認された。

得られた窒素溶脱量は、様々な窒素に由来しているが、その大部分は施肥窒素と土壌窒素である。既往のライシメーター試験のほとんどは、無肥料区で得られた値を土壌窒素由来とみなし、施肥区との差を施肥窒素由来としている。しかし、山口¹⁰¹⁾や山室¹⁰²⁾が指摘しているように無肥料区と施肥区では栄養環境が異なるため作物の根系発達に差を生じ、それに伴う養分吸収量や土壌中での窒素の有機化無機化過程に大きな差異を生ずると考えられる。そこで、本研究においてはシバとナガイモについて¹⁵Nトレーサー法を用いて解析し、施肥窒素の影響を解明した。

シバ畑においては、施肥開始後3か月間は施肥窒素の溶脱は認められず、夏の7～8月になってから施肥窒素の割合が高まり、10～11月に窒素溶脱量の約50%が施肥窒素由来となることが明らかとなった。これに対しナガイモ畑では、施肥開始1か月後の5月には23%が施肥窒素で占められ、8月のピーク時には46%が施肥窒素に由来していた。これらの溶脱時期の差は、黒ボク土と砂質土という土壌理化学性によるものと考えられ、砂質土においては施肥窒素の溶脱が速やかであることを示している。また、シバ畑、ナガイモ畑とも次作の施肥開始前でも、窒素溶脱量の10%程度が前年に施肥した窒素に由来することが本研究によって明らかとなった。ナシ園においてはライシメーターの規模が大きいこともあり、¹⁵Nトレーサー法による施肥窒素の解析はでき

なかったが、既往のデータを参考に施肥窒素の寄与を推定した。

第 6-1 図に各作物の施肥窒素の分配割合をまとめた。年間の施肥窒素の溶脱割合は、シバ畑（1995 ～ 1996 年の平均値）で 13 %，ナガイモ畑（1995 年）で 41 %，ナシ園（1981 ～ 1985 年の平均値）で 33 % 以下となり，施肥窒素の溶脱量は，それぞれ 4.3gm^{-2} ， 16.2gm^{-2} ， 5.6gm^{-2} 以下と見積もられた。シバ畑においては，吸収割合が 52 % と高く，次いで土壤に 28 % が残存し，溶脱割合は少ないという特徴を示した。ナガイモ畑では，土壤残存割合が 14 % と少なく，溶脱割合は吸収と同程度の 41 % と多くなった。砂質ナガイモ畑においては，施肥窒素の多くが溶脱している実態にあることが示された。また，ナシ園における溶脱割合は 33 % 以下と推定され，本研究においては確定できなかったものの，実態としては，草生による吸収増加に伴って，シバ畑と同程度にまで減少すると考えられた。これらの結果は，既往の報告例にないものであり，施肥窒素溶脱軽減のための施肥改善に活用できる。

2. 窒素溶脱に影響を及ぼす要因

本研究における試験結果から，窒素溶脱に影響する要因として，施肥窒素量，降水量，土壤窒素無機化量，肥料の種類，地表面管理様式があげられる。

施肥窒素量は，ナシ園において施用量の増加とほぼ等比級数的に窒素溶脱量が増加していたことから，窒素溶脱に最も影響の大きい要因と考えられる。施肥窒素の作物による利用率は，シバで 52 %，ナガイモで 41 %，ナシで 40 % 程度と推定され，いずれの作物も施肥窒素の約半分は未利用となっている。このことは，施肥窒素量が多くなればそれだけ溶脱も増加することを示している。従って，窒素溶脱量低減のためには，施肥窒素量を抑えることが第一に有効と判断できる。

小川ら⁹⁾は，現状の施肥窒素量はかなり過剰となっているものが多く，20 ～ 30 % の減肥をしても大きな収量減にはならないと指摘している。当面は，窒素溶脱に最も影響の大きい施肥窒素量を効率的に削減する必要がある。

畑地において施用された窒素は，どのような形態であれ好気条件下で硝酸化され土壤中を移動することになる。この場合，移動速度は降水量によって変動することが予想される。飼料作物栽培下での調査¹⁰³⁾によれば，降水量が 2,000mm

以下であれば、窒素溶脱率は 15 % 以下であるが、2,400mm 以上になると 30% 以上に増加するとしている。本ライシメーター試験においても窒素溶脱量の年次変動は、年毎の降水パターンの影響が大きかった。

シバやナガイモは、施肥期間が 3 ～ 9 月であり、この期間の降水量の多少が窒素溶脱量に影響している。黒ボク土シバ畑では、430mm の連続降雨（1995 年 7 月 1 ～ 27 日）により、1 か月で年間溶脱量の 24 % が溶脱した。また、ナガイモではこの期間に 66 % が溶脱し、平年の 2.3 倍の量となった。これに対し、少雨年では窒素吸収量が増加し、窒素溶脱量が少なくなる傾向を示した。芝野ら²⁸⁾によると、月々の窒素溶脱量は、当月あるいは前月の降水量に影響を受け、この 2 つの関数と窒素溶脱量との相関が高いと述べており、多量の降雨や過剰かん水が窒素溶脱を助長することが伺われる。ナシにおいては、秋冬期の施肥窒素の影響が大きく、シバやナガイモのような短期間に集中した窒素溶脱は認められず、毎年 1 ～ 5 月に窒素溶脱量が多くなるという周期性を示した。ナシではこの時期だけで年間溶脱量の 72.0 ～ 80.9 % が溶脱するという特徴が明らかとなった。

硝酸態窒素の移動速度は、各ライシメーター試験における降水量と浸透水の濃度ピークの発現時期から推定できる。土壌表層に施用した施肥窒素の影響が、深さ約 1 m の浸透水に現れるまでの降水量は、黒ボク土シバ畑で約 400mm、砂質土ナガイモ畑で約 200mm、黒ボク土ナシ園で約 1,000mm と推定される。移動速度は硝酸態窒素を吸着する土壌粒子の陽荷電の量や土壌中における水移動の難易によって決まると考えられ、砂質土では粘度含量が少なく粗孔隙が多いため、窒素の溶脱を容易にしている。黒ボク土では、陰イオン吸着能の高い粘土粒子の他に多量の腐植を多く含んでおり、腐植層の厚いナシ園において移動しにくくなっていると推察される。

ナガイモ畑では、施肥によって土壌中の窒素濃度が高まりやすく、梅雨期のような集中降雨に遭遇すると、窒素溶脱が多くなると予想される。シバ畑においては、窒素吸収が旺盛な時期は土壌中の窒素濃度が高まりにくいため、降雨による影響は少なくなると考えられるが、根系が浅いので根系外に溶脱するのに要する降水量は少ない。ナシ園においては、秋冬期の施肥窒素は地温が低いため、土壌中の窒素濃度の上昇は緩やかであるが、この時期は窒素吸収量が少

ないため降雨によって徐々に溶脱し、翌春までにほとんどが溶脱すると考えられる。

土壌の種類による差異は、土壌窒素無機化量の多少によるものと考えられる。溶脱窒素の由来は、量的には施肥窒素以外の窒素が多く、土壌窒素からの無機化の影響が大きいと考えられる。無肥料無植生条件における窒素溶脱量は、シバで $13.7 \sim 27.5 \text{ gm}^2$ 、ナシで $16.8 \sim 21.1 \text{ gm}^2$ 、無肥料のナガイモで $10.9 \sim 34.3 \text{ gm}^2$ となり、それぞれ通常の施肥窒素量の 41 ~ 115 %、101 ~ 126 %、28 ~ 87 % に相当する量となった。また、¹⁵N トレーサー法によって求めた土壌窒素の割合は、シバで 62.9 %、ナガイモで 67.7 % となり、溶脱窒素の由来は当年の施肥窒素よりも土壌窒素無機化に由来する窒素が多いことが明らかとなった。

土壌窒素の無機化は、地温上昇とともに進行し夏期に最大となる。無肥料無植生状態とした黒ボク土において、浸透水の硝酸態窒素濃度は 10 ~ 1 月に高まり、土壌窒素無機化の影響が現れた。これに対し、施肥栽植条件ではこの時期に低濃度で経過しており、作物による吸収によって濃度が低下したものと考えられた。Owen ら ¹⁰⁴⁾ は植生のない裸地条件において、窒素溶脱が多くなることを指摘している。このことは、夏期に裸地条件にすると土壌窒素の溶脱が促進され、窒素溶脱量が増加することを示唆している。

近年、高齢化と後継者不足によって耕作放棄地が増加しており、除草のために夏期に耕耘や除草剤を処理する場合も散見される。窒素溶脱軽減のためには、被覆作物を導入して土壌窒素の積極的な吸収を図ることが有効であろう。

施肥に用いる窒素肥料は、アンモニアや硝酸を含む無機質肥料と動植物粕を原料とする有機質肥料に大別される。また、堆肥類の中にも無機態と有機態窒素が含まれ、窒素供給源となっている。有機質肥料や堆肥からの窒素の無機化は、C/N 比によって分類 ¹⁰⁵⁾ され、C 含量が多いほど無機化が少なくなるとされている。

畑地における窒素溶脱を考える場合には、その形態が何であれすべて硝酸となって行動するため、肥培管理によって土壌中の硝酸濃度がどの時期にどの程度高まるかが重要である。最も効率的な窒素供給は、作物の窒素吸収量に一致するように各肥料を組み合わせで行うことである。根域において過剰な濃度になる期間が短いほど、溶脱の危険は少なくできる。それぞれの慣行施肥法は、

作物生産を重視した方法となっており、窒素溶脱に関してはあまり考慮されていない。シバでは生育初期にやや過剰な供給になっていること、ナガイモでは生育期間中の追肥が多く土壌中の窒素濃度が高レベルにあること、ナシでは秋冬期の施用割合が高すぎることで窒素溶脱軽減に向けての改善点として指摘できる。

本研究では、肥料窒素による影響の解析を中心としたが、窒素溶脱に対しては堆肥窒素の影響も大きいことが指摘されている。堆肥施用に伴う窒素溶脱量の変化についてみると、水稻-野菜輪作¹⁰⁶⁾において、慣行の2倍量のオガクズ牛糞 4kgm^{-2} 施用によって窒素溶脱量が1.3倍に増大すること、キャベツ-サトイモの野菜作¹⁰⁷⁾では堆肥 $5 \sim 10\text{kgm}^{-2}$ 施用で窒素溶脱量が2～3倍に増加すること、また、施設トマト連続栽培¹⁰⁸⁾では10倍量の 500kgm^{-2} の施用によって、窒素溶脱量が8～10倍に増加する事例が報告されている。さらに、家畜糞尿についても、多施用は肥料窒素の数倍の窒素溶脱を引き起こすとする報告^{109,110)}もある。堆肥施用による窒素溶脱量の増加を引き起こさないためには、堆肥の適正施用量の設定¹¹¹⁾と堆肥施用量に応じた肥料窒素の削減¹¹²⁾が重要となる。シバでは 4kgm^{-2} 、ナガイモとナシでは 2kgm^{-2} が堆肥施用の基準となっており、堆肥窒素を含めて窒素溶脱の評価をすることが重要と思われる。

被覆肥料を用いて作物への窒素供給の効率化を図る試みが、種々の作物で検討されている。根域において硝酸態窒素濃度を常に低く保てば、窒素溶脱量を少なくできる。そのためには、作物の窒素吸収と窒素供給が一致した施肥をすることが有効であり、窒素溶出を調節できる被覆肥料を用いることにより窒素溶脱の低減が期待できる。

本研究の対象としたシバ、ナガイモ、ナシは生育期間が長いため、今のところ窒素溶脱の減少に効果のある被覆肥料の種類や施用法は特定されていない。供試した被覆肥料は、省力化を考慮して全量1回施用を前提としたため、各作物とも窒素供給の過不足を生じ、慣行施肥以上の収量や生育を得ることはできなかった。また、窒素溶脱についてはシバで減少傾向にあったが、ナガイモとナシでは増加する結果となった。しかし、本研究では各作物について被覆肥料の窒素溶出特性を明らかにすることができた。ナガイモやナシについては、得られた結果をもとに、適切な被覆肥料の種類や施用時期を調整してより最適化

することで、窒素溶脱の減少に対して効果を高めることが期待できる。

ナシ園においては地表面を草生状態にすることで、窒素溶脱量が大きく減少できることを確認した。樹園地では地表面管理法が窒素溶脱に影響する大きな要因となっている。しかし、ナシ樹との養分競合も認められており、これを回避しながら窒素溶脱の軽減を図ることが重要と考える。

3. 地下水汚染への影響と今後の課題

硝酸態窒素および亜硝酸態窒素は、乳幼児のメタヘモグロビン症を引き起こすとされ¹⁾、これを防止するため飲料水の水質基準として 10mgL^{-1} 以下が設定されている。越野¹¹³⁾のまとめによると、欧米では発病事例が多く死亡に至る事例も報告されているが、わが国では発病の事例はまだないとされる。地下水の硝酸汚染については、既に多くの報告がある。欧米ではかなりの高率で基準値を超えており、濃度上昇傾向にあるとされる。一方、わが国においては、藤井ら⁶⁷⁾が土地利用別に地下水の硝酸態窒素濃度を取りまとめた結果によると、林地や草地では水質基準以下であったのに対し、畑地や樹園地において基準値を超えるものが多くあり、施肥窒素量の増大とともに濃度上昇傾向が伺われ、地下水の硝酸汚染が全国的に進行しつつあるとされている。

鳥取県の農耕地では、砂丘畑において基準値を上回る事例¹¹⁴⁾も観測されているが、汚染源や濃度の動向等の詳細については不明な点が多い。本研究のようなライシメーター試験による基礎調査は、作物毎の窒素溶脱特性を知る上できわめて有意義と考える。しかし、現地ほ場と異なり地形や周辺の植生等は反映されないという欠点もある。地域の実態と今後の動向を知る上にも、現地ほ場において地形や作物毎に定点を設けて、モニタリングを実施することが重要である。モニタリングにあたっては、作物の根域下層と地下水の濃度を合わせて測定し、農耕地から地下水域への影響を解明することが望まれる。本研究で得られた浸透水の硝酸態窒素濃度は、深さ約 1m のものであり、これらが地下水に対してどういう影響を及ぼすかについては、明らかではない。根域下層の浸透水が地下水域に達するまでには、かなりの時間が必要であること、その間に脱窒による損失、他の流入水により希釈されることが考えられる。

Adriano ら¹¹⁵⁾によると、硝酸の土壌中での下降速度は、 $0.3 \sim 3\text{my}^{-1}$ であり、

地下水面が深い場合には、溶脱窒素が地下水域に到達するまでに 10 年以上かかるとしている。また、豊島¹¹⁶⁾によると、ダイコンの慣行施肥によって、深さ 30cm の土壤溶液中の窒素濃度が最高値として 480mgL^{-1} に達し、深さ 70cm では降雨によって 2 倍程度に希釈され、その影響として、地下水面 2m において $1.1 \sim 1.6\text{mgL}^{-1}$ の濃度上昇が観測されたとしている。さらに、扇状地において地下水の硝酸態窒素濃度の分布を調べた結果¹¹⁷⁾、窒素負荷源から下流方向へ急激に濃度が低下する不連続な分布が形成されており、負荷源地帯の濃度 10mgL^{-1} が地下水流により 3mgL^{-1} 程度に希釈される事例が報告されている。今後は、畑地からの溶脱窒素が地下水に対してどの程度の影響を及ぼすかについて解明する必要がある。

作物根域の窒素濃度については、本研究でも用いた土壤溶液採取によるモニタリングが種々の作物^{118 ~ 121)}で検討され、施肥管理に役立てられているが、地下水との関連については不明な点が多い。近年、畑地における物質移動を推定するシミュレーションモデルもいくつか構築され、窒素溶脱の予測^{122,125)}が試みられている。本ライシメーター試験の結果をもとに、タンクモデル法を用いて水移動の予測を試みたところ、実測値と推定値は良好な適合性が得られている¹²⁴⁾。これに溶質移動に関するファクターを組み込むことで、地下水域までの推定が可能となるだろう。

地下水における窒素負荷の由来を特定することも重要である。トレーサーとして塩素等が硝酸態窒素の追跡^{125, 126)}に利用されている。また、近年は安定同位体比による起源推定^{43, 127,128)}も有効な方法として活用されるようになっていく。今後は、これらの方法を活用して地下水の窒素起源を明らかにする必要がある。

また、地目連鎖系においては、畑地からの流出窒素が水田や草地において浄化されること^{129,130)}が知られており、これらの除去機能を考慮した地目連鎖モデル¹³¹⁾も構築されている。研究の対象とした鳥取県中部地域においては、丘陵地にシバとナシが分布し、平坦地の水田を経て海岸部の砂丘畑にナガイモが栽培されている。この地域における地下水汚染への影響については、地目連鎖の影響を加味して窒素溶脱過程を解析することが今後の課題である。

4. 窒素施肥の問題点と改善方向

わが国においては、適切な農業生産活動を通じて国土の環境保全を図るという観点から、1992年に新しい農業政策が発表された。その内容は、農業の有する物質循環機能を生かし、生産性の向上を図りつつ環境への負荷軽減に配慮した持続的な農業の確立を目指そうというものである。それを受けて鳥取県では、地域の環境保全と持続的な農業の実現のために、化学肥料及び農薬使用量の削減と畜産有機物のリサイクルによる地力増強を柱とした施策を推進している。その中で施肥改善については、慣行栽培における化学肥料施用量を3割削減することを目標に、作物毎の施肥法及び土壌管理法を見直すとしている。

農業経営においては収益性の向上が前提であり、低コストで収量を確保しながら地域環境への負荷を少なくすることが要求される。窒素施肥は、作物の生育促進に最も影響が大きい養分であり、増施による効果も高い。しかし、その吸収割合は多くとも50%程度であり、大半は溶脱に関与している。窒素溶脱の低減には減肥が最も効果的であるので、一定の収量が維持できる範囲で施肥削減をすることは有意義である。

本研究の結果から、慣行施肥のシバでは4～5月の生育初期、ナガイモでは梅雨時期にあたる7月、ナシでは10～12月の秋冬期における施肥が窒素溶脱を増加させる傾向にあるので、まずこれらの時期の減肥が有効であると考えられる。さらに、それぞれの作物について全体的な施肥量削減も考慮することが必要であり、作物毎にどこまで窒素供給量を削減できるかについて明らかにすることが重要となる。そのためには、各作物の窒素吸収パターンを再検討し、吸収型に合致した窒素供給へ改善していくことが必要である。

窒素施肥は、土壌中の窒素濃度が作物の必要量を大きく越えないように施用することが大切となる。肥料の種類は、化学肥料のみが環境への負荷源として強調されているが、目的とする窒素供給を得るために好適な種類を選択して用いれば良いと考える。まず、時期毎に土壌窒素の発現量を把握し、不足量を肥料窒素で補給する。無機質肥料（化学肥料）は速やかな濃度上昇、有機質肥料は緩やかな濃度上昇、堆肥類は土壌窒素発現量の増加に効果がある。しかし、いずれの肥料も施用量が多くなれば窒素濃度が過大となり、溶脱量が多くなる。なかでも、無機質肥料は窒素濃度が高まりやすく、肥効が高い反面、溶脱也多

くなる危険があるので、施用時期と1回の施用量を考慮する必要がある。

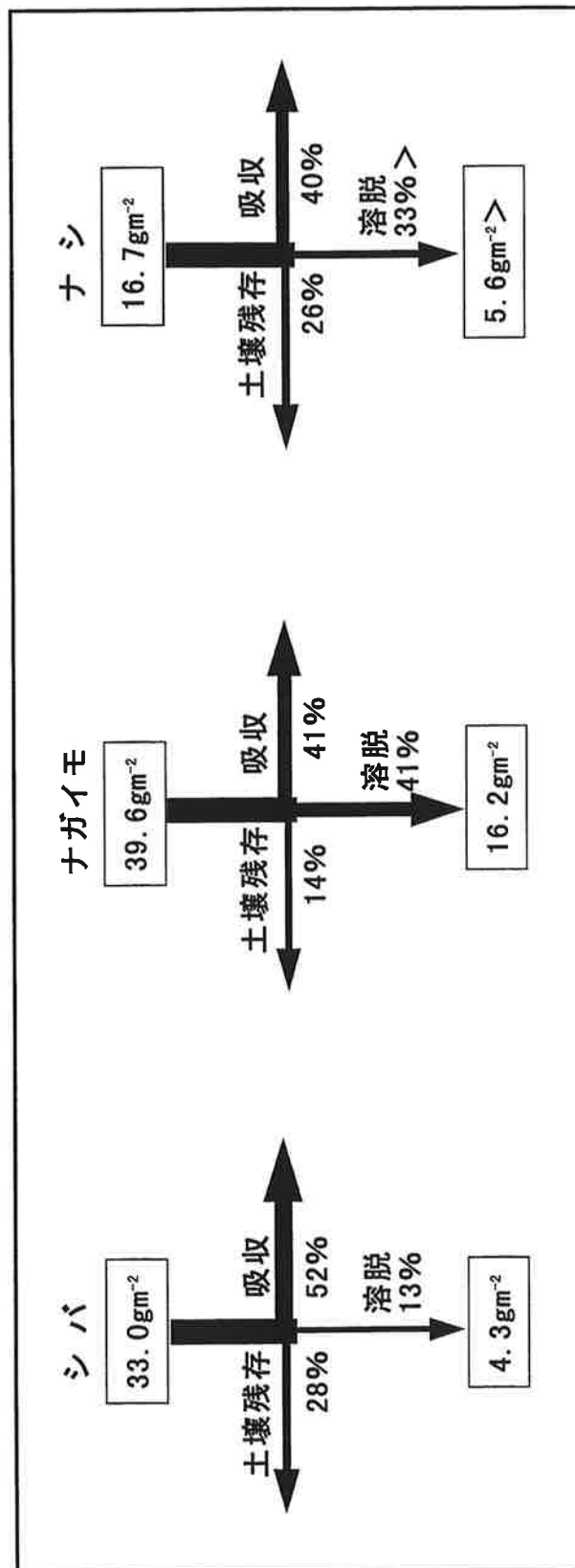
黒ボク畑のシバやナシは、土壌窒素発現量が多く、肥料窒素による速効的な肥効をあまり必要としない作物である。このような作物に対しては、有機質肥料を主体とした施肥体系でも支障のない肥効が得られ、化学肥料の大幅な削減が可能である。一方、砂畑のナガイモは土壌窒素の発現量が少なく、肥料窒素が生産性に大きく影響する。本ライシメーター試験の結果から判断すると、浸透水の硝酸態窒素濃度を 10mgL^{-1} 以下にするためには、現行の施肥窒素量を少なくとも5割以下にする必要があると考えられる。しかし、そこまでの減肥は生産性の低下を伴うことが予想される。砂畑においては、被覆肥料の利用や効率的な分施によって現状の生産性を維持しながら2～3割の減肥が可能とされるが、これよりさらに減肥するためには、新たな溶脱防止技術の導入が必要である。有機物施用による硝酸態窒素の有機化、イオン交換樹脂等の資材による吸着が注目されており、実用性について検討する余地がある。

土壌施用した窒素は、多かれ少なかれその一部は溶脱することになる。窒素溶脱の解消には土壌施用以外の窒素供給法を組み入れることが有効であろう。葉面散布は微量要素の補給に多く用いられているが、窒素等の多量要素の供給も可能である。窒素供給の一部を葉面散布で代替できれば溶脱を低減できる。しかし、効果的な処理方法や代替効果については不明な点も多く、今後の検討が必要である。また近年、施設野菜を中心に養液栽培が注目されている。この栽培法は、系外に養液を排出しないので窒素溶脱の心配は全くない。また、果樹では根域を主幹部周囲に限定した根域制限栽培がいろいろな樹種で試みられている。根域制限栽培における窒素施肥は、根群密度の高い限定された範囲に行うため、吸収率の向上による溶脱軽減が期待できる。これらのような新しい窒素供給法を用いれば、窒素溶脱の低減に有効であると思われるが、実用化には経済性や溶脱防止効果を解明する必要がある。

本研究では、ライシメーター試験によってシバ、ナガイモ、ナシにおける窒素溶脱過程と窒素収支を明らかにできた。そして、その結果から溶脱軽減へ向けて、いくつかの改善点を指摘できた。しかし、検討すべき点も多く残されており、今後のさらなる研究が必要である。

第6-1表 ライシメーター試験によるシバ、ナガイモ、ナシの窒素溶脱量

(調査期間) 作目 (土壌の種類)	施肥窒素量 ($\text{gm}^{-2}\text{y}^{-1}$)	浸透水量 ($\text{Lm}^{-2}\text{y}^{-1}$)	浸透水の硝酸態窒素濃度 (mgL^{-1})		窒素溶脱量 ($\text{gm}^{-2}\text{y}^{-1}$)
			年平均	最低値 最高値	
(1994～1996) シバ (表層腐植質黒ボク土)	24～33	1,215～1,541	5.8～9.3	1.5 19.8	8.8～14.4
(1994～1996) ナガイモ (砂丘未熟土)	39.6	1,330～1,988	17.8～28.0	3.0 103.0	23.7～52.7
(1982～1985) ナシ (厚層腐植質黒ボク土)	16.7	771～1,527	6.8～13.0	1.1 48.9	7.3～13.5



第6-1図 シバ, ナガイモ, ナシに対する施肥窒素の分配割合

第7章 総括および結論

近年、畑地からの窒素溶脱に起因する地下水の硝酸汚染が問題化しているが、鳥取県中部地域の主要作物であるシバ、ナガイモ、ナシにおける窒素溶脱の実態は明らかではない。そこで、ライシメーター試験によってこれらの作物における施肥窒素の溶脱過程と窒素収支を明らかにした。また、それぞれの作物について、被覆肥料による窒素溶脱への影響を検討し、溶脱軽減のための基礎資料を得ようとした。得られた成果を要約すると次のとおりである。

1. 黒ボク土のシバ畑において、慣行施肥として 33gm^2 の窒素を4月から9月にかけて11回に分施し、窒素の溶脱過程と収支を明らかにした。また、施肥窒素の行動を ^{15}N トレーサー法を用いて解析した。

- 1) 土壌溶液中の硝酸態窒素濃度は、土壌表層において生育初期に上昇が認められたが、シバの生育が旺盛となった夏期には、植物吸収による濃度低下が認められた。
- 2) 慣行施肥における浸透水中の硝酸態窒素濃度は、7月に上昇し夏期（7～9月）に最大となった。そして11月には低下し、冬期（2～3月）には最低値を示した。
- 3) 年間の窒素溶脱量は慣行施肥で 11.6gm^2 となった。そのうち、 4.3gm^2 が施肥窒素に由来することを ^{15}N トレーサー法によって明らかにした。
- 4) 慣行施肥でのシバの窒素吸収量は 29.0gm^2 で、そのうち施肥窒素吸収量は 17.0gm^2 であった。また、収穫後の土壌中には、 9.4gm^2 の施肥窒素が残存した。
- 5) シバ畑における窒素収支を求めたところ、施肥窒素の51.5%がシバによる吸収割合、28.6%が土壌中の残存割合、13.2%が根域下層への溶脱割合と推定された。

2. 砂質土のナガイモ畑において、慣行施肥として4月から9月に 40gm^2 の窒素を11回に分施し、窒素の溶脱過程と収支を明らかにした。また同様に、 ^{15}N トレーサー法によって施肥窒素の行動を追跡した。

- 1) ナガイモ畑における浸透水中の硝酸態窒素濃度は、7月に最高（ $36\sim 104\text{mgL}^{-1}$ ）となり、冬期に最低（ $3\sim 6\text{mgL}^{-1}$ ）となった。

- 2) 年間の窒素溶脱量は、慣行施肥で $24\sim 53\text{gm}^2$ を示し、そのうち $8\sim 16\text{gm}^2$ が生育期に施用した施肥窒素に由来していた。
 - 3) ナガイモの窒素吸収量は $26\sim 28\text{gm}^2$ となり、施肥窒素吸収量は $16\sim 17\text{gm}^2$ であった。また、収穫後の土壌中には、 $6\sim 7\text{gm}^2$ の施肥窒素が残存した。
 - 4) 砂質土ナガイモ畑に施用された 40gm^2 の施肥窒素は、41 %がナガイモによって吸収され、41 %が根域下層に溶脱し、14 %が土壌中に残存した。
3. 黒ボク土のナシ園においては、慣行施肥として 16.7gm^2 の窒素を4回に分施し、その窒素の溶脱過程と収支を明らかにした。さらに、施肥量の増加および草生導入に伴う窒素溶脱への影響について検討し、施肥窒素の許容限界量を推定した。
- 1) 浸透水の硝酸態窒素濃度は、毎年1～5月に最高値($36\sim 103\text{mgL}^{-1}$)となり、10～11月に最低値($3\sim 6\text{mgL}^{-1}$)を示した。そして、年平均濃度は $6.8\sim 13.0\text{mgL}^{-1}$ となった。
 - 2) 年間の窒素溶脱量は 13.1gm^2 となり、施用量の78.5 %に相当する量が溶脱した。窒素溶脱は1～5月に多く、この期間だけで年間溶脱量の72.0～80.9 %を占めた。
 - 3) 無肥料条件における浸透水の年平均硝酸態窒素濃度は 10.2mgL^{-1} が測定され、窒素溶脱量は 18.4gm^2 となった。この値は施肥窒素量を上回っており、土壌窒素の無機化による影響が大きかった。
 - 4) ナシに施用された 16.7gm^2 の施肥窒素は、40 %がナシに吸収され、34 %が溶脱すると推定された。
 - 5) 施肥窒素量の増加によって浸透水の硝酸態窒素濃度が上昇し、 18.4gm^2 以上の窒素施肥で浸透水の年平均窒素濃度が 10mgL^{-1} を越えると推定された。
 - 6) 牧草草生の導入によって窒素溶脱量が減少し、施肥窒素量 22.2gm^2 では、清耕期間の 17.7gm^2 に比べ草生期間は 1.8gm^2 となった。
4. 各作物について、被覆肥料の施用が窒素溶脱に及ぼす影響を明らかにした。
- 1) シバに対する LP70 と LPS100 の混合施用は、慣行の11回分施に比べ生育後期の窒素肥効の持続性が劣った。窒素溶脱量は、20 %の減肥によって28 %に減少した。

- 2) ナガイモに対するロング 140 やロング 180 の施用は、慣行の 11 回分施より生育後半まで窒素溶出が続いた。窒素溶脱量は、生育期間中は慣行施肥と同程度であったが、収穫後に多くなった。
- 3) ナシに対する LPS100 と化成肥料の混合施用は、慣行の 4 回分施より夏期の窒素溶出が多かった。窒素溶脱量は、慣行施肥より冬期に減少したが秋期には増加し、35 % の増加となった。
- 4) 窒素溶脱量は、用いた被覆肥料の窒素溶出と対象作物の窒素吸収に差が多い場合に増加する傾向にあった。窒素溶脱量の減少には、作物の窒素吸収型にできるだけ近似した窒素溶出型となるように、被覆肥料を組み合わせる施用することが有効と考えられた。
5. 得られた結果を総合して窒素溶脱の実態について考察し、窒素溶脱軽減のための方策について論及した。
 - 1) シバ畑においては、現状の施肥量であればシバの旺盛な窒素吸収によって、地下水汚染に至るような窒素溶脱は生じないと判断した。しかし、生育初期は吸収量が少ないため、窒素溶脱が多くなる危険があった。シバの窒素吸収に適合した施肥法への改善や被覆肥料の利用によって、さらに窒素溶脱を軽減できることを指摘した。
 - 2) ナガイモ畑においては、窒素溶脱量が多い実態にあると考えられた。特に、施肥期間に多量の降雨があると、土壌中の窒素のほとんどが溶脱することを述べた。ナガイモでは、減肥と適切な水管理が重要であることを指摘した。
 - 3) ナシ園においては、秋冬期に施肥した窒素の溶脱量が多い実態にあると判断した。そして、この時期の減肥が窒素溶脱の軽減に有効であることを指摘した。また、草生状態では、草の窒素吸収量に応じて窒素溶脱が著しく減少すること明らかにし、窒素溶脱の低減効果が高いことを示した。
 - 4) 今後、環境への負荷の少ない持続的な営農のためには、モニタリングによる実態把握を強化し、本研究で得られた窒素溶脱過程と窒素収支を活用することによって窒素溶脱の予測法を確立し、環境変動を監視することが重要であることを述べた。

謝 辞

本研究は，鳥取大学農学部教授本名俊正博士に懇切なご指導をいただいた．ここに，衷心より深甚なる謝意を表します．

また，本研究を遂行するにあたり有益なご助言とご校閲を賜った山口大学農学部進藤晴夫教授，島根大学生物資源科学部若月利之教授，鳥取大学農学部山内益夫教授，鳥取大学農学部藤山英保教授，鳥取大学農学部山本定博助教授に謹んで感謝の意を表します．

鳥取県園芸試験場において本研究の機会と激励をいただいた元場長米山寛一博士，同宇田川英夫博士，同上田弘美博士，同内田正人博士，場長井上耕介氏に厚く感謝の意を表します．また，本研究の長期にわたるライシメーター試験に携わり多大なご協力をいただいた試験場各位，とくに元土壌肥料長浦木松寿氏，同田中章氏，果樹研究室長村田謙司氏に謝意を表します．さらに，桶本弥生さん，増井邦子さんには浸透水の採取および測定の一部を担当していただいた．ここに記して感謝の意を表します．

引用文献

- 1) R.F.Follet, D.R.Keeney and R.M.Cruse : Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability, p.1 ~ 375, *Soil Sci. Soc.Am.*, Madison(1991)
- 2) Burt,T.P., Heathwaite,A.L. and Trudgil,S.T.: Nitrate;Processes, Patterns and Management, p.1 ~ 444, John Wiley & Sons, Chichester , England (1993)
- 3) Anderson, J.H.: Agriculture and natural resources : The broadening horizon; in Rural Groundwater Contamination, ed. F.M.D'Itri and L.G. Wolfson, p.3 ~ 13, Lewis, Michigan (1987)
- 4) 早瀬達郎 : 米国・E Cにおける地下水硝酸汚染の現状(1~3), 農及園, **68**, 544 ~ 548, 663 ~ 666, 1165 ~ 1168(1993)
- 5) 尾崎保夫 : 農耕地における肥料成分の動態と制御(2) - 農業産地における地形作目連鎖系の活用 -, 農及園, **68**, 657 ~ 662(1993)
- 6) 小川吉雄・酒井 一 : 畑地からの窒素の流出制御 - 環境保全・省資源施肥への提言 -, 農及園, **61**, 15 ~ 20(1986)
- 7) 山本洋司・朴 光来・中西康博・加藤 茂・熊澤喜久雄 : 宮古島地下水中の硝酸態窒素濃度と $\delta^{15}\text{N}$ 値, 土肥誌, **66**, 18 ~ 26(1995)
- 8) 各務原市地下水汚染研究会 : 各務原台地の地下水汚染の原因究明と将来予測, 季刊環境研究, **75**, 21 ~ 32 (1989)
- 9) 北島敏和 : 黒ボク土壌における「にんじん」の効率的施肥, 岐阜県農技セ資料, 1 ~ 14(1990)
- 10) 桜井善雄 : 農地排水による河川および地下水の汚染, 農土誌, **43**, 14 ~ 20 (1975)
- 11) 農林水産技術会議事務局編 : 農林業における水保全・管理機能の高度化に関する総合研究, 研究成果, **308**, p.1 ~ 216(1996)
- 12) 農林水産技術会議事務局編 : 耕草地管理に基づく窒素, リンの発生負荷低減に関する研究, 研究成果, **272**, p.1 ~ 221(1992)
- 13) 農林水産技術会議事務局編 : 農林生態系利用による浅層地下水の水質浄化

技術の開発に関する研究，研究成果，**328**， p.1 ～ 153 (1998)

14) 農林水産技術会議事務局編：農耕林地における地下水の水質変動機構の解明に関する研究，研究成果，**277**， p.1 ～ 134 (1992)

15) 中村直彦編：ノシバ，コウライシバ，p.268 ～ 270，ソフトサイエンス社，東京(1993)

16) 日本芝草学会編：芝生と緑化，p.268 ～ 270，ソフトサイエンス社，東京(1988)

17) Starr, J.L. and H.C. DeRoo : The fate of nitrogen applied to turfgrass, *Crop Sci.*, **21**, 531 ～ 536 (1981)

18) Mancino, C.F., W.A.Torello and D.J. Wehner : Denitrification losses from Kentucky bluegrass sod, *Agron. J.*, **80**, 148 ～ 153 (1988)

19) Synder, J.L., B.J. Augustin and J.M. Davison : Moisture sensor-controlled irrigation for reducing N leaching in Bermudagrass turf, *Agron. J.*, **76**, 964 ～ 969 (1984)

20) Brown, K.W., R.L.Duble and J.C. Thomas : Influence of management and season on fate of N applied to golf greens, *Agron. J.*, **69**, 667 ～ 671 (1977)

21) 竹内誠：農耕地からの窒素・リンの流出，土肥誌，**68**， 708 ～ 715 (1997)

22) 環境庁水質管理課監修：硝酸性窒素による地下水汚染対策ハンドブック，p.1 ～ 244，公害研究対策センター，東京(1993)

23) 土壌標準分析・測定法委員会編：土壌標準分析・測定法，p.94 ～ 114，博友社，東京(1986)

24) 亀和田國彦：黒ボク土露地での水分および硝酸イオンの周年的垂直移動，栃木農試研報，**43**， 19 ～ 34 (1995)

25) 上村春美：斜面ライシメーターにおける水収支の研究(1)，農土試技報，**A14**， 1 ～ 16 (1977)

26) 野中昌法・加村崇雄：ライシメーターによる砂丘畑地の施肥窒素の溶脱と窒素収支，土肥誌，**66**， 372 ～ 380 (1995)

27) 松丸恒夫：黒ボク土と砂質土における肥料溶脱のライシメーター法による解析，土肥誌，**68**， 423 ～ 429 (1997)

28) 芝野和夫・大野芳和：露地野菜畑における窒素の溶脱，野菜・茶試研報，**A2**， 201 ～ 208 (1988)

29) 松下研二郎・藤島哲男，宇田川義夫：鹿児島県における火山灰土壌畑地の

- 生産力と各主成分の溶脱について－ライシメーター試験－（第3報），土肥誌，**43**，333～338(1972)
- 30) 日高伸・伊藤信：荒川扇状地における地下水水質の実態解明と調査法，埼玉農試研報，**42**，61～83(1987)
- 31) 藤井信一郎：芝畑の施肥とかん水技術，芝草研究，**16**，45～58(1987)
- 32) 稲部善博・中田久雄：砂丘地土壌における数種肥料の養分の溶脱とブドウの肥効に関する研究－ライシメーター試験－，石川県砂丘地農試研報，**1**，1～28(1976)
- 33) 松丸恒夫：黒ボク土と砂質土における肥料溶脱のライシメーター法による解析，土肥誌，**68**，423～429(1997)
- 34) 野中昌法・阿部良悦・田辺博：砂丘畑地の施肥窒素に起因する地下水の硝酸態窒素濃度の上昇，日砂丘誌，**44**，23～29（1997）
- 35) 野中昌法・加村崇雄：ライシメーターによる砂丘畑地の施肥窒素の溶脱と窒素収支，土肥誌，**66**，372～380(1995)
- 36) 佐藤一郎・山根昌勝：砂丘地ナガイモに対する被覆肥料の効果，砂丘研究，**27**(2)，1～11（1981）
- 37) 中本洋・下野勝昭・谷口健雄：北海道のナガイモ栽培における窒素施肥法の改善，土肥誌，**65**，194～198(1994)
- 38) Chichester, F.W. : Effect of increased fertilizer rates on nitrogen content of runoff and percolate from monolith lysimeters, *J. Environ. Qual.* , **6**, 211～217(1977)
- 39) 藤山英保・三谷達夫・長井武雄：砂丘土壌での三要素の移動と作物による吸収に及ぼす灌水量の影響，土肥誌，**54**，512～518(1983)
- 40) Hergert, G.W. : Nitrate leaching through sandy soil as affected by sprinkler irrigation management, *J. Environ. Qual.* , **15**, 272～278(1986)
- 41) 長井武雄：砂丘畑における水管理上の問題点，砂丘研究，**37**(1)，1～6(1990)
- 42) 小川吉雄・吉原 貢：畑地からの窒素流出に関する研究，茨城農試特別研報，**4**，1～70(1979)
- 43) 中西康博ら： $\delta^{15}\text{N}$ 値利用による地下水硝酸起源推定法の考案と検証，土肥誌，**66**，544～551(1995)
- 44) 長谷嘉臣：傾斜地果樹園からの肥料成分の流出量，果樹試報E，**6**，53～64

(1986)

- 45) 渡辺毅・田辺賢治・荻野幸治：ウメ植栽土壌における肥料成分の動向と溶脱について，福井園試報，7，31～41(1990)
- 46) 安田道夫・梅村善章・佐藤雄夫：ブドウ樹生育土壌における窒素の動態について，果樹試報 A，15，59～69(1988)
- 47) 山崎清功・徳留昭一・氏家勉：傾斜地における土壌利用方式が物質の動態に及ぼす影響，四国農試報，45，93～146(1985)
- 48) 船引真吾・永木幸江・坂本辰馬・薬師寺清司・奥地進：温州ミカンのライシメーター試験について(第1報)肥料成分の流亡，土肥誌，34，125～130(1963)
- 49) 船引真吾・坂本辰馬・上村親士・奥地進：温州ミカンのライシメーター試験について(第2報)土壌の反応・有機物・置換容量および置換性塩基に対する窒素肥料の種類ならびに土壌管理の影響，土肥誌，35，196～300(1964)
- 50) 坂本辰馬・奥地進・薬師寺清司：温州ミカンのライシメーター試験について(第3報)温州ミカンの生育収量ならびに施肥区と無施肥区のカリ吸収量，土肥誌，35，426～430(1964)
- 51) 坂本辰馬・奥地進：温州ミカンのライシメーター試験について(第4報)温州ミカンに対するウレアホルム系窒素の肥効，土肥誌，36，165～168(1965)
- 52) 船引真吾・吉永長則・上村親士：温州ミカンのライシメーター試験について(第5報)リン酸の行動，土肥誌，38，388～393(1967)
- 53) 船引真吾・吉永長則・上村親士：温州ミカンのライシメーター試験について(第6報)有効態リン酸について，土肥誌，38，394～396(1967)
- 54) 農林水産省果樹試験場編：果樹園における土壌窒素発現の実態と施肥法の問題点(鳥取県におけるナシ二十世紀の施肥法)，49～52(1986)
- 55) 赤木三郎：大山火山の地質，日本自然保護協会調査報告，45，9～32
- 56) 農林水産省果樹試験場編：落葉果樹における施肥の現状と環境保全的課題(青森県におけるリンゴの施肥の現状と課題)，p.14～15(1996)
- 57) 農林水産省果樹試験場編：落葉果樹における施肥の現状と環境保全的課題(福井県におけるウメの施肥の現状と課題)，p.46～47(1996)
- 58) 神野雄一・生田進・山本定博・本名俊正：ナシ園における土壌溶液中の窒素の動態，土肥講要，35，135(1989)

- 59) 神野雄一：ナシに対する窒素施肥が土壌溶液中の窒素濃度に及ぼす影響，園芸学会中四国支部会要旨，**33**，7(1994)
- 60) 小松喜代松・佐藤雄夫・佐々木生雄：果樹園における初冬期施用窒素の溶脱と土壌物理性との関係，福島果樹試研報，**10**，35～45(1982)
- 61) 浦木松寿・安酸俊行・田中章雄：昭和 47 年度落葉果樹試験研究打合会議資料(1972)
- 62) 佐藤雄夫・佐々木生雄・鈴木継明・小松喜代松：リンゴ園の窒素施肥に関する研究（第1報），福島果試研報，**8**，1～16(1978)
- 63) Kenzo, K. : Trace of ^{15}N Applied to Deciduous Fruit Trees, JARQ, **25**, 141～147 (1991)
- 64) 高辻豊二・犬塚和男・後田経雄：草生ミカン園における窒素動態の解析，九州農業研究，**51**，221 (1989)
- 65) 木方展治・結田康一：茶園および隣接林地の土壌水中硝酸態窒素の分布，土肥誌，**62**，156～164 (1991)
- 66) 長谷川清善・奥村茂雄・小林正幸・中村稔：茶園・水田連鎖地形における富栄養化成分の行動，滋賀農試研報，**26**，34～41 (1985)
- 67) 藤井国博・岡本玲子・山口武則・大嶋秀雄・大政健次・芝野照夫：農村地域における地下水の水質に関する調査データ (1986～1993)，農業技術研究所資料，**20**，p.1～329 (1997)
- 68) 平野暁・菊池卓郎編：果樹の物質生産と収量，p.297～303，農文協，東京 (1989)
- 69) 千葉勉編：果樹園の土壌管理と施肥技術，p.159～173，博友社，東京(1982)
- 70) 渋川潤一：果樹園の草生栽培—その歴史と展望—，牧草と園芸，**37**，7，12～15 (1989)
- 71) 梅宮善章：果樹の草生栽培の長所と短所，果実日本，**51**，7，20～23 (1996)
- 72) 岩谷齊：リンゴの草生栽培における利点と留意点，果実日本，**51**，7，34～38 (1996)
- 73) 小豆沢斉：ブドウ栽培における草管理の課題と留意点，果実日本，**51**，7，40～43 (1996)
- 74) 北口美代子：ナシの草生栽培における課題と留意点，果実日本，**51**，7，47

～ 51 (1996)

- 75) 木原武士：清耕法と草生法のメカニズム，果実日本，**44**，6，18～22 (1996)
- 76) Takeshi K. and Kenji K.: Quantitative Estimates of the Budgets of Nitrogen Applied as Fertilizer, Urine and Feces in a Soil-Grass System, *JARQ*, **25**, 101～107 (1991)
- 77) 井田明・犬塚和男・林田至人：草生ミカン園における施肥窒素の吸収利用（第3報）ミカン樹と草による春肥窒素の吸収，九州農業研究，**44**，88 (1982)
- 78) 井田明・犬塚和男・林田至人：草生ミカン園における施肥窒素の吸収利用（第4報）ミカン樹と草による夏肥窒素の吸収，九州農業研究，**44**，89 (1982)
- 79) 佐藤雄夫・佐々木生雄：リンゴ園の施肥窒素に関する研究（第2報）リンゴ樹の窒素吸収に対する草生および敷草の影響，福島果試研報，**10**，23～33 (1982)
- 80) 田中謙・宮川健一：リンゴ園の土壌管理に関する研究（第1報）土壌管理の違いによる跡地土壌の地力，長野果樹報告，**1**，31～51 (1983)
- 81) Starr, J.L. and H.C. DeRoo : The fate of nitrogen applied to turfgrass, *Crop Sci.*, **21**, 531～536 (1981)
- 82) Rolston, D.E., Sharpley, A.N. and Toy, D.W. : Field measurement of denitrification III, Rates during irrigation cycles, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**, 289～296 (1982)
- 83) Ryden, J.C.: Denitrification loss from a grassland soil in the field receiving different rates of nitrogen as ammonium, *J. Soil Sci.*, **34**, 355～365 (1983)
- 84) 北村秀教・今井克彦：水稻の全量元肥施肥技術，土肥誌，**66**，71～79 (1995)
- 85) 金田吉弘：不耕起移植栽培の育苗箱全量施肥技術，土肥誌，**66**，176～181 (1995)
- 86) 高橋能彦：ダイズの深層施肥技術，土肥誌，**66**，277～285 (1995)
- 87) 古屋 栄：果樹の被覆肥料施肥技術，土肥誌，**66**，176～181 (1995)
- 88) 高橋正輝：野菜の施肥技術，土肥誌，**69**，201～205 (1998)
- 89) 尾和尚人：新しい肥料の開発，化学と生物，**29**，651～658 (1991)
- 90) 藤沼善亮：被覆肥料の利用，研究ジャーナル，**17**，44 (1994)
- 91) 庄子貞雄：農法を変革するコーティング肥料，化学と生物，**31**，777～779 (1993)
- 92) 松丸恒夫：被覆肥料利用による畑地からの肥料窒素溶脱抑制，土肥誌，

68,430 ~ 434(1997)

93) 林 悦之：砂丘地栽培ナガイモほ場における施肥の実態と施肥窒素量の削減，鳥取県園試報，**3**，15 ~ 27(1999)

94) 全農肥料農薬部肥料技術普及課編：平成2年度果樹の窒素施肥法改善による品質向上試験成績書，全農（1991）

95) 全農肥料農薬部肥料技術普及課編：平成4年度被覆肥料の果樹根域制限栽培への応用に関する試験成績書，全農(1993)

96) 全農肥料農薬部肥料技術普及課編：平成5年度被覆肥料の果樹根域制限栽培への応用に関する試験成績書，全農(1994)

97) 佐藤一郎：砂丘地ナガイモの栄養生理に関する研究(第3報)，砂丘研究，**11**(2)，40(1973)

98) 千葉 勉編：果樹園の土壌管理と施肥技術，p.363 ~ 366，博友社，東京(1982)

99) 吉岡 四郎・安間 貞夫，大野 敏朗，千葉農試研報，**11**，28 ~ 40(1971)

100) 神野雄一：被覆肥料の秋期施用がナシの樹体生育と果実品質に及ぼす影響，近畿中国農研，**93**，55 ~ 59(1997)

101) Junichi, Y. : Fertilizer-Nitrogen Absorption Determined by the ^{15}N Isotopic and Difference Methods, JARQ, **25**, 93 ~ 100(1991)

102) 山室成一：水田における無機化と有機化・脱窒・吸収の動態に関する ^{15}N トレーサー法の理論的アプローチと水稻窒素吸収量予測，九州農試報告，**27**，1 ~ 64(1991)

103) 草野 秀：九州火山灰畑土壌の肥沃化に関する研究，九州農業研究，**29**，157 ~ 158(1967)

104) Owen, T., R. Jurgens-gschwind: Nitrates in drinking water, *Ferti. Res.*, **10**, 3 ~ 25(1986)

105) 志賀一一・大山信雄・前田乾一・鈴木正昭：各種有機物の水田土壌中における分解過程と分解特性に基づく評価，農研センター研報，**5**，1 ~ 9(1985)

106) 長谷川清善・小林正幸・中村稔：水田における有機物施用が水質に及ぼす影響(第3報) オガクズ牛糞堆肥，稲わら施用と畑転換の影響・ライシメーター試験，滋賀農試研報，**26**，20 ~ 33(1985)

107) 吉浦昭二・林勝實・北崎佳範・桑野幸男：豚ふん堆肥の施用及び作付様式

- が用水分の動向に及ぼす影響，大分農技センター研報，**16**，43～62(1986)
- 108) 大西成長・吉田光二・佳山良正：施設栽培における厩肥施用が土壤溶液および溶脱水に及ぼす影響，土肥誌，**55**，316～320(1984)
- 109) Weil, R.R., R.A. Weismiller, and R.S. Turner: Nitrate contaminations of groundwater under irrigated Coastal Plain soils, *J. Environ. Qual.*, Vol. **19**, 441～448 (1990)
- 110) Bertilsson, G.: Lysimeter studies of nitrogen leaching and nitrogen balances as affected by agricultural practices. *Acta Agriculture Scandinavia* **38**, 3～11 (1988)
- 111) 大村邦男・黒川春一：水質環境からみた牛糞尿の許容限界量，北海道立農試集報，**64**，1～12(1992)
- 112) 藤山正史・中島征志郎：有機質素材の窒素分解率を考慮した化学肥料の節減効果，長崎総農林試研報，**20**，93～107(1992)
- 113) 越野正義：硝酸塩の植物体内での集積，肥料と環境保全，早瀬達郎・安藤淳平・越野正義編，p.227～252，ソフトサイエンス社，東京(1976)
- 114) 本名俊正：砂丘地における地下水汚染の実態，鳥取県土壤肥料研究会会報，**3**，58～80(1996)
- 115) Adriano, D.C., P.F. Pratt, and F.H. Takatori, Nitrate in the unsaturated zone of an alluvial soil in relation to fertilizer nitrogen rate and irrigation level. *J. Environ. Qual.*, Vol. **1**, p.418～422(1972)
- 116) 豊島正幸：畑地における窒素肥料成分のゆくえ，東北農業試験場たより，No. **85**，16(1998)
- 117) 豊島正幸：浅層地下水の硝酸性窒素分布に現れた不連続性について－福島盆地南部の扇状地地帯の事例－，岩手県立大学総合政策学会編，総合政策，**1**(2)，173～178(1999)
- 118) 鳥山和伸：土壤中の窒素のモニタリングと水稻の施肥管理，農業技術，**43**，30～32(1988)
- 119) 伊藤純雄：土壤溶液に基づく施設内土壤診断と管理，農及園，**59**，965～968(1984)
- 120) 神野雄一：土壤溶液診断によるナシ園の環境調和型施肥，今月の農業，**10**，47～50(1995)
- 121) 吉川重彦・橘 尚明：三重県北勢地域における多肥茶園の土壤溶液組成，

土肥誌, **57**, 509 ~ 511 (1986)

122) 太田弘毅・大場和彦・長谷川功・桃木徳彦・塩野隆弘：南九州火山性台地畑における土壌水分収支のタンクモデル法による解析, 九州農試報告, **27**, 207 ~ 237 (1992)

123) 木方展治・大場和彦・タレブレ イスラム・雁野勝宣・桃木徳彦・長谷川功：タンク係数を用いるモデルによる各種畑作物栽培における硝酸態窒素溶脱量の推定, 九農研報, **56**, 71 (1994)

124) 鳥取県園芸試験場編：タンクモデルによる浸透排出水量の推定, 平成 8 年度鳥取県園芸試験場試験成績書 (果樹編), p.17 ~ 24 (1997)

125) 安田道夫・佐藤雄夫：施肥窒素の土層内移動とそのトレーサーとしての塩素利用の可能性, 果樹試報, **A13**, 61 ~ 67 (1986)

126) Cameron, K.C. and Wild, A. : Comparative rate of leaching of chloride , nitrate and titrated water under field conditions, J. Soil Sci., **33**, 649 ~ 657 (1982)

127) 米山忠克・笹川英夫：土壌－植物系における炭素, 酸素, 水素, イオウの安定同位体自然存在比：1987 年以降の研究の進歩, 土肥誌, **65**, 585 ~ 598 (1994)

128) 朴 光来・山本洋司・日高 信・加藤 茂・熊澤喜久雄：埼玉県における露地野菜畑土壌からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と $\delta^{15}\text{N}$ 値, 土肥誌, **66**, 146 ~ 154 (1995)

129) 早川嘉彦・寶示戸雅之・宮地直道・草場 敬・金澤健二：地形連鎖の中での地目の変化に伴う地下水水質の変動, 土壌の物理性, **76**, p.39 ~ 45 (1997)

130) 長谷川清善・奥村茂夫・小林正幸・中村 稔：茶園・水田連鎖地形における富栄養化成分の行動, 滋賀農試研報, **26**, 34 ~ 41 (1985)

131) 田渕俊雄：水田除去機能付き窒素流出モデル, 土壌の物理性, **78**, 11 ~ 18 (1998)

Summary

Studies on Nitrogen Leaching in Upland Fields

-Analysis of Nitrate Leaching and Nitrogen Balance by Lysimeters-

Yuichi JINNO

Ground water pollution has become a serious problem caused by nitrogen leaching in upland fields. Turfgrass, Chinese yam and Pear are major crops in the central part of Tottori prefecture, but there is still no understanding of the actual situation of nitrogen leaching under these crops.

The objective of this study was to determine nitrogen balance through lysimeter experiments. The effects of coated fertilizer in reducing nitrate leaching were also investigated.

The results are summarized as follows:

1. In an Andosol cultivated to turfgrass, 33 gm^{-2} of nitrogen was applied using standard application procedures by split-dressing 11 times from April to September. Nitrogen balance and nitrate leaching were determined, while the behavior of fertilizer nitrogen was analysed by ^{15}N tracer technique. It was found that:

(i) During the early stage of growth, the nitrate concentration in the soil solution was higher in the upper soil layer, but during the active stage of growth, the concentration decreased due to plant uptake.

(ii) Nitrate concentration in leaching water was highest during summer (July to September), and lowest during winter (February to March).

(iii) The annual amounts of leached nitrogen was 11.6 gm^{-2} , and 4.3 gm^{-2} of the nitrogen was derived from fertilizer.

(iv) The total amount of nitrogen absorbed by turfgrass was 29.0 gm^{-2} , out of which 17.0

gm^{-2} was derived from fertilizer. After harvesting, the amount of fertilizer nitrogen accumulated in the soil was 9.4 gm^{-2} .

(v) When 33.0 gm^{-2} of nitrogen was applied as fertilizer to the turfgrass field, it was estimated from nitrogen balance that 51.5% of the fertilizer nitrogen was absorbed by turfgrass, 28.5% was accumulated, and 13.2% was leached.

2. In a sandy soil cultivated to chinese yam, 40 gm^{-2} of nitrogen was applied by split-dressing 11 times from April to September. Nitrogen balance and nitrate leaching were also determined, and the behavior of fertilizer nitrogen was analysed as in previous experiment. It was found that:

(i) Nitrate concentration in leaching water gradually increased, reaching the highest value ($36\sim 103 \text{ mgL}^{-1}$) in July, but the lowest value ($3\sim 6 \text{ mgL}^{-1}$) was obtained in winter.

(ii) The annual amount of leached nitrogen was $24\sim 53 \text{ gm}^{-2}$, and $8\sim 16 \text{ gm}^{-2}$ of the nitrogen was derived from fertilizer.

(iii) The total amount of nitrogen absorbed by chinese yam was $26\sim 28 \text{ gm}^{-2}$, out of which $16\sim 17 \text{ gm}^{-2}$ was derived from fertilizer. After harvesting, the amount of fertilizer nitrogen accumulated in the soil was $6\sim 7 \text{ gm}^{-2}$.

(iv) When 40 gm^{-2} of nitrogen was applied, 41% of nitrogen was absorbed by chinese yam, 14% was accumulated in the soil, and 41% was leached.

3. In an Andosol cultivated to pear, 16.7 gm^{-2} of nitrogen was applied by split-dressing 4 times. Nitrogen balance and nitrate leaching were determined, and the effects of the amount of fertilizer nitrogen and sod culture on nitrate leaching were also studied in order to estimate the tolerance limit of application.

(i) Nitrate concentration in leaching water indicated high values ($36\sim 103 \text{ mgL}^{-1}$) during January to May, and low values ($3\sim 6 \text{ mgL}^{-1}$) during October to November each year. The annual average nitrate concentration was $7 \sim 13 \text{ mgL}^{-1}$ during 1981 ~ 1985.

(ii) The annual amount of leached nitrogen was 13 gm^{-2} . It was observed that the amount of leached nitrogen from January to May constituted $72 \sim 81\%$ of the annual amount.

(iii) In the non fertilized plot, nitrate concentration in leaching water was 10.2 mgL^{-1}

while the annual amount of leached nitrogen was 18.4 gm^{-2} . This value was higher than that in the standard plot, suggesting that most of the leached nitrogen was derived from the soil.

(iv) When 16.7 gm^{-2} of nitrogen was applied, 40% of nitrogen was absorbed by the Pear tree while 34% of nitrogen was leached.

(v) The higher the rate of nitrogen application, the higher the nitrate concentration. It was estimated that applying more than 18.4 gm^{-2} of nitrogen caused over 10 mgL^{-1} of nitrate concentration.

(vi) Using sod culture, the amount of leached nitrogen decreased remarkably. When 22.2 gm^{-2} of nitrogen was applied, the amount of leached nitrogen decreased from 17.7 gm^{-2} in clean culture to 1.8 gm^{-2} in sod culture.

4. Under each crop, the effects of using coated fertilizer on nitrogen leaching was studied.

(i) Under turfgrass, the value of solubilized nitrogen using coated fertilizers (70 day-type and 100 day-type mixed) was lower than standard application (split dressing 11 times) at the late stage of growth. The amount of leached nitrogen decreased by 28% using coated fertilizer.

(ii) Under Chinese yam, the value of solubilized nitrogen using coated fertilizers (140 day-type or 180 day-type) was higher than standard application (split dressing 11 times) at the late stage of growth. During the period of growth, no difference was found between both plots. After harvesting, the amount of leached nitrogen increased in the coated fertilizer plot.

(iii) Under Pear, the value of solubilized nitrogen using coated fertilizers (100 day-type and normal compound fertilizer mixed) was higher than standard application (split dressing 4 times) in summer. As a result of using coated fertilizer, the amount of leached nitrogen was lower in winter, and higher in autumn. The annual amount of leached nitrogen showed an increase of 35% over the standard application.

(iv) When the difference between the amount of solubilized nitrogen by coated fertilizer and that absorbed by plants is large, the amount of leached nitrogen tends to be high.

To reduce nitrogen leaching, it is necessary to use some type of coated fertilizer mix which is just enough to meet plant uptake.

5. The actual situation of nitrate leaching and the method of prevention were discussed. The conclusions are as follows:

- (i) Nitrate leaching in turfgrass field showed low value in the active stage of growth due to vigorous plant uptake, but in the early stage, nitrate leaching could be a problem due to poor uptake. The leaching can be minimized by using coated fertilizers.
- (ii) In the chinese yam field, nitrate leaching was high because of high precipitation. To reduce the leaching, it is necessary to reduce the amount of application, and also to avoid surplus irrigation.
- (iii) In the pear orchard, fertilizer applied in autumn or winter caused much leaching. Reducing the leaching requires reducing the rate of application of nitrogen during this period. Furthermore using sod culture can reduce the leaching in proportion to the uptake by bottom grass.
- (iv) In order to reduce the impact on environment and to sustain cultivation, it is important to intensify monitoring of water quality and establish the method for the inspection of nitrate leaching using the results obtained in these studies.

学会誌公表論文

1. ライシメーター試験によるシバ畑における施肥窒素の溶脱過程と窒素収支

神野雄一，本名俊正

日本土壌肥料学雑誌，第 70 巻，第 3 号，297 ～ 305 頁，1999

本学位論文の第 2 章に相当

2. ライシメータによる砂丘地ナガイモ畑における施肥窒素の溶脱過程と窒素収支の解析

神野雄一，本名俊正

日本砂丘学会誌，第 46 巻，第 1 号，27 ～ 36 頁，1999

本学位論文の第 3 章に相当